



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

**EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM V OBLASTI LEPENÝCH
LAMELOVÝCH PRVKŮ NA BÁZI LISTNATÝCH
KLIMATOLERANTNÍCH DŘEVIN**

EXPERIMENTAL RESEARCH IN THE FIELD OF GLUE LAMINATED ELEMENTS ON THE BASIS
OF CLIMATE TOLERANT DECIDUOUS TREES

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Eva Šuhajdová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAN PĚNČÍK, Ph.D.

BRNO 2020

Abstrakt

Disertační práce je zaměřena na výzkum využitelnosti v současnosti pro stavebnictví nevyužívaných listnatých dřevin. Práce obsahuje rozbor mechanických vlastností listnatých dřevin a jejich ověření experimentem. Pro výběr nejvhodnější použitelné listnaté dřeviny v podmínkách střední Evropy je aplikována matematická analýza využívající metody PROMETHEE. Nejvhodnější vyhodnocená dřevina (buk) je poté podrobena dalším zkouškám: zkouškám únosnosti zubovitého spoje a zkouškám lepeného lamelového homogenního a hybridního nosníku. Výsledky zkoušek jsou srovnávány s hodnotami dostupnými v odborné literatuře.

Klíčová slova

Listnaté dřeviny, buk lesní (*Fagus sylvatica*), lepené lamelové dřevo (LLD), fyzikální vlastnosti dřeva, mechanické vlastnosti dřeva, multikriteriální analýza, zubovitý spoj

Abstract

The Doctoral thesis is focused on research of usability hardwood, that is commonly not used in structural engineering nowadays. Analysis of known hardwood mechanical properties and its verification by experiment was made. Mathematic analysis using the PROMETHEE method was used for most suitable hardwood species selection in the Central Europe conditions. The most suitable hardwood – beech – was subjected for further tests: finger-joint load bearing capacity experiment and beech homogenous and hybrid glulam experiment. The test results are compared with the values from professional literature.

Key words

Hardwood, beech (*Fagus sylvatica*), glue laminated timber (glulam), physical properties, mechanical properties, multicriteria analysis, finger-joint

Bibliografická citace VŠKP

ŠUHAJDOVÁ, E. *Experimentální výzkum v oblasti lepených lamelových prvků na bázi listnatých klimatolerantních dřevin*. Brno, 2020. 153 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Pěňčík, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 30. 6. 2020

Eva Šuhajdová

Poděkování

Mé poděkování patří mému vedoucímu disertační práce doc. Ing. Janu Pěňčíkovi, Ph.D. za cenné rady, prof. Ing. Miloslavovi Novotnému, CSc. za spolupráci během zpracovávání doktorského tématu a doc. Ing. Pavlu Schmidovi, Ph.D. za pomoc při provádění experimentů a možnost využít zkušební laboratoře Ústavu stavebního zkušebnictví.

Největší poděkování za velkou podporu pak patří mé rodině – manželovi a dětem.

V Brně dne 30. 6. 2020

Eva Šuhajdová

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	11
2.1	Dřeviny v České republice a střední Evropě	11
2.1.1	Současná skladba lesa České republiky	11
2.1.2	Změny v druhové skladbě lesa v ČR.....	13
2.1.3	Lesy v Evropské unii	16
2.1.4	Přehled dřevin rostoucích na území České republiky podle jejich využití ve stavebnictví.....	17
2.2	Stavba a vlastnosti klimatolerantních dřevin.....	24
2.2.1	Srovnání vnitřní stavby listnatých a jehličnatých dřevin	24
2.2.2	Srovnání vybraných fyzikálních a mechanických vlastností listnatých a jehličnatých dřevin	33
2.3	Listnaté dřevo jako vysoce funkční materiál	38
2.3.1	Historické použití listnatého dřeva pro stavební účely.....	38
2.3.2	Možnosti využití listnatých dřevin v současnosti.....	40
2.3.3	Lepené lamelové dřevo	44
2.3.4	Výzkum v oblasti využití listnatého dřeva u nás a v zahraničí	53
2.3.5	Zkušenosti s použitím listnatých dřevin v konstrukcích pozemních staveb...	54
2.3.6	Faktory ovlivňující možnost použití listnatého dřeva ve stavebnictví	62
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	66
3.1	Vymezení oblasti klimatolerantních dřevin aplikovatelných v konstrukcích pozemních staveb.....	67
3.2	Ověření vlastností klimatolerantních dřevin.....	67
3.3	Analýza nejvhodnější dřeviny (nejvhodnějších dřevin) pro danou aplikaci.....	67
3.4	Ověření funkčnosti geometrie zubovitého spoje	67
3.5	Popis chování LLD nosníku na bázi listnatých dřevin	67
3.6	Prostředky k naplnění cílů	68
4	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	69
4.1	Teoretické metody	69
4.1.1	Studium dostupných podkladů	69
4.1.2	Matematická analýza	69

4.2	Experimentální metody.....	74
4.2.1	Experimentální určení vlastností listnatých dřevin	74
4.2.2	Experimentální zkoušení únosnosti zubovitých spojů pro podélné napojování lamel listnatého dřeva.....	80
4.2.3	Experimentální ověření chování nosníků LLD	84
4.3	Komparativní metody	90
5	VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE	91
5.1	Vymezení oblasti klimatolerantních dřevin aplikovatelných v konstrukcích pozemních staveb.....	91
5.2	Vybrané vlastnosti klimatolerantních dřevin.....	93
5.2.1	Objemová hmotnost (experiment 1A).....	94
5.2.2	Pevnost v ohybu (experiment 1B).....	95
5.2.3	Modul pružnosti v ohybu (experiment 1C)	96
5.2.4	Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny (experiment 1D).....	98
5.2.5	Výskyt suků a rovnovláknitost	100
5.3	Vyhodnocení nejvhodnější dřeviny (nejvhodnějších dřevin) pro použití v nosných konstrukcích pozemních staveb	100
5.3.1	Shrnutí porovnávaných vlastností	100
5.3.2	Hodnocení metodami PROMETHEE I a II.....	102
5.4	Experimentální výzkum zubovitých spojů vybraných listnatých dřevin.....	105
5.4.1	Výsledky experimentů.....	105
5.4.2	Srovnání s literaturou	107
5.5	Experimentální výzkum lepených lamelových prvků z vybraných listnatých dřevin	108
5.5.1	Bukové a topolové dřevo.....	109
5.5.2	Zkoušky lamel	110
5.5.3	Zkoušky lepených lamelových nosníků	116
6	ZÁVĚRY PRO PRAXI	125
6.1	Vymezení oblasti klimatolerantních dřevin aplikovatelných v konstrukcích pozemních staveb.....	125
6.2	Ověření vlastností konkrétního listnatého dřeva	125
6.2.1	Objemová hmotnost	125
6.2.2	Pevnost v ohybu	126

6.2.3	Modul pružnosti v ohybu	127
6.2.4	Pevnost v tlaku	128
6.3	Analýza nejvhodnější dřeviny pro použití v nosných konstrukcích pozemních staveb	128
6.4	Experimentální ověření funkčnosti geometrie zubovitého spoje.....	128
6.5	Návrh lepeného prvku.....	129
6.6	Shrnutí.....	130
7	MOŽNOSTI DALŠÍHO VÝZKUMU	132
7.1	Rozšíření výzkumu zubovitých spojů.....	132
7.2	Rozšíření výzkumu lepených lamelových prvků z listnatého dřeva.....	132
	Použitá literatura	135
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	143
	Seznam obrázků	146
	Seznam tabulek	150

1 ÚVOD

Užití dřeva pro stavební konstrukce má dlouhou tradici a v současnosti se dřevo opět stalo vyhledávaným stavebním materiálem. Zejména obnovitelnost zdroje tohoto materiálu odpovídá současnému environmentálnímu pohledu na výstavbu. Symbolem současné doby je návrat k přírodě, k přírodním a místním zdrojům, přičemž využívání místních zdrojů je nejen ekologické, ale i ekonomické.

Tradiční dřevěné stavby i stavby s dřevěnými konstrukcemi velkých rozpětí a složitých geometrických tvarů jsou podle [1] navrhovány a realizovány v souvislosti s významným rozvojem nových technologií výroby dřevěných prvků, materiálů a spojů v současné době. Se zřetelem k výhodným vlastnostem dřeva a materiálů na bázi dřeva bude podle [1] vývoj dřevěných konstrukcí pokračovat, přičemž zájem investorů, architektů i realizačních firem o dřevěné konstrukce je stále velký. Kromě toho, že se dřevo používá v tradičních střešních konstrukcích a obytných budovách, může být použito v nebytových moderních konstrukcích se značným rozpětím, pro výškové budovy, lávky a mosty, jakož i pro speciální konstrukční systémy [2].

Velký rozvoj v posledních letech prodělal nejen vývoj materiálů na bázi dřeva, ale i pohled na použití samotného dřeva rostlého. Eliminace negativních vlastností rostlého dřeva, jako borcení, vznik výsušných trhlin, omezená délka profilu aj., bylo dosaženo výrobou prvků z více dřevěných lamel spojovaných k sobě pomocí lepených spojů, tzv. lepeného lamelového dřeva.

K tradičním místním zdrojům na území ČR patří zejména měkké dřevo, zejména smrkové. Návratu k přirozeným podmínkám místního klimatu odpovídá dlouhodobé snižování porostních ploch jehličnatých a navyšování porostních ploch listnatých dřevin [3]. Lokálním zdrojem budoucnosti tedy s velkou pravděpodobností nebude jen jehličnaté dřevo, ale s významným podílem i dřevo listnatých dřevin. V České republice však prozatím není připravenost na změnu nabídky dřevní suroviny velká ani ve stavebním ani v dřevozpracujícím průmyslu a přístup k využití listnatého dřeva je poměrně konzervativní. V ostatních zemích střední Evropy, kde probíhá obdobná změna, je toto téma již několik let velmi aktuální.

Na dřevěné stavební konstrukce je možné použít dřevo jehličnatých i listnatých dřevin vhodných fyzikálních a mechanických vlastností. Využití jehličnatých dřevin má u nás již dlouhou tradici, tvrdých listnatých dřevin se u nás v současnosti pro nosné konstrukce využívá minimálně, zejména z důvodu jeho vyšší ceny. Podle [3] a [4] lze v budoucnosti očekávat

nedostatek smrkového a nadbytek listnatého, zejména bukového dřeva. V návaznosti na zvýšení porostních ploch listnatého dřeva lze rovněž očekávat výrazné změny cen řeziva kopírující změny v jeho nabídce.

Jednou z možností využití listnatého dřeva je jeho použití v lepených prvcích, výrobou prvků z několika slepených lamel lze dosáhnout eliminaci negativních vlastností rostlého dřeva a nabízí se velká škála možností dosažení požadovaných vlastností pomocí kombinace lamel.

Pro využívání listnatého dřeva jako konstrukčního materiálu však v zásadě naprosto chybí jakákoliv legislativní základna. Normy na třídění listnatého dřeva sice v České republice existují, přiřazení k pevnostním třídám však má legislativně podchyceno ze všech Evropských zemí pouze Německo. Rovněž absentují předpisy na výrobu a zkoušení prvků z listnatého dřeva.

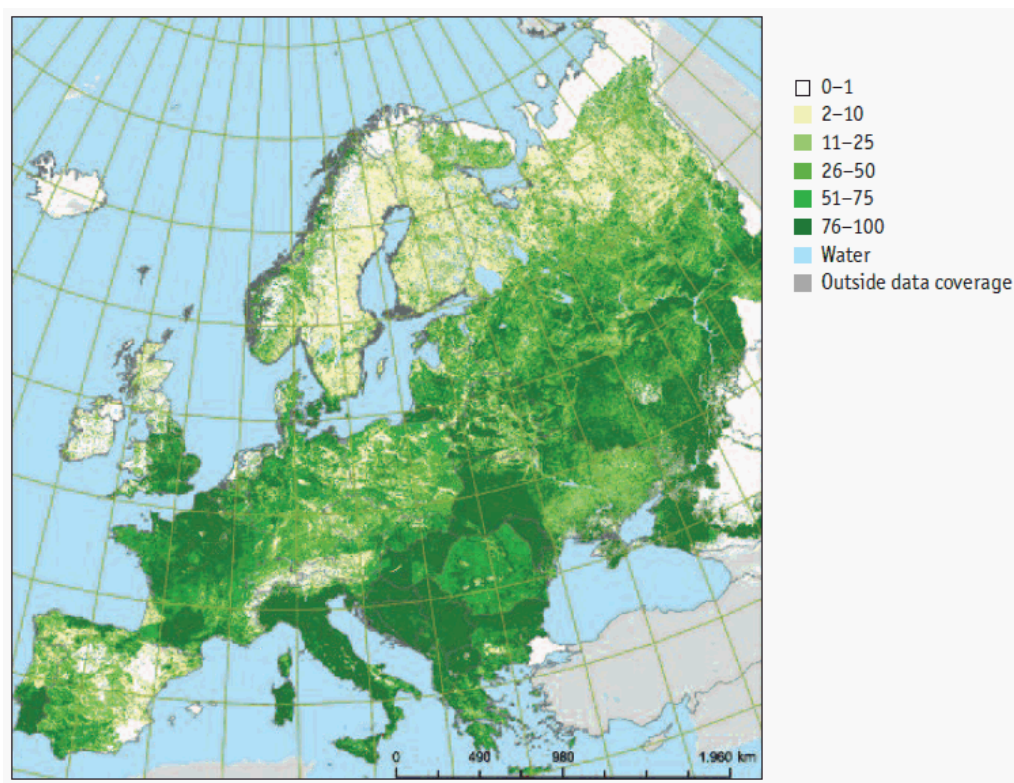
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

2.1 Dřeviny v České republice a střední Evropě

2.1.1 Současná skladba lesa České republiky

Lesy pokrývají třetinu celého území České republiky a tvoří přirozený ekologický potenciál krajiny [5]. Mezi evropskými státy zaujímá Česká republika v lesnatosti 12. místo. Navíc plocha lesních pozemků v České republice trvale roste, v roce 2017 se plocha lesních pozemků meziročně zvýšila o 1 809 ha a má se zvyšovat ještě i v roce 2030 [4].

Jak je zřetelné z Obr. 1, při mezinárodním srovnání patří Česká republika společně s Polskem, Ukrajinou, Rakouskem a skandinávskými zeměmi mezi státy s nejnižším podílem listnatých porostů na celkové rozloze státu, na rozdíl od Slovenska, Rumunska a Ruska, které patří mezi státy s největším zastoupením listnatých lesů [5].

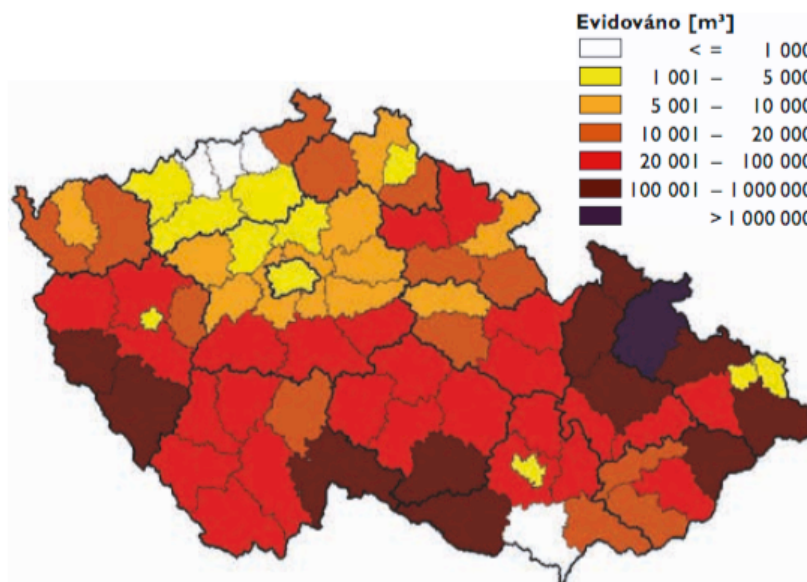


Obr. 1 Podíl listnatých porostů na celkové rozloze států v Evropě (v %), mezinárodní srovnání z r. 2005 [5].

Vlivem rostoucí populace se zvýšila poptávka po dřevní hmotě jako hlavním zdroji energie. V minulosti proto docházelo k plošnému vysazování rychle rostoucích smrkových (*Picea abies*) a borových (*Pinus sylvestris*) monokultur. Došlo tak ke změnám v druhové i prostorové

strukturu lesních porostů. Lesy České republiky jsou dnes tvořeny převážně monokulturními stejnověkými porosty zbavené různorodosti s nepřírozenou dominancí jehličnatých (komerčních) dřevin. Dochází k degradaci lesa i biodiverzity lesních ekosystémů, tyto porosty mnohem snadněji podléhají narušení abiotickými (vítr, mráz, sucho) a biotickými (škůdci) vlivy. Není zajištěna stabilita lesních ekosystémů a trvalá udržitelnost produkce lesů a zabezpečení jejich mimoprodukčních funkcí [5].

Už dnes se asi padesát procent těžby smrkového dřeva odehrává nuceně kvůli klimatickým změnám či například napadení kůrovcem (Obr. 2). Prostředí pro pěstování smrků není již v dnešní době na většině míst v republice ideální, zejména vysoké teploty a dlouhotrvající sucha smrkům nesvědčí. V tomto prostředí se zhoršuje zdravotní stav tohoto přirozeně horského druhu a dřeviny jsou potom náchylné na škůdce. Je pravděpodobné, že v důsledku klimatických změn budou lesy velkoplošně usychat, což způsobí problém v produkci dřeva [6].



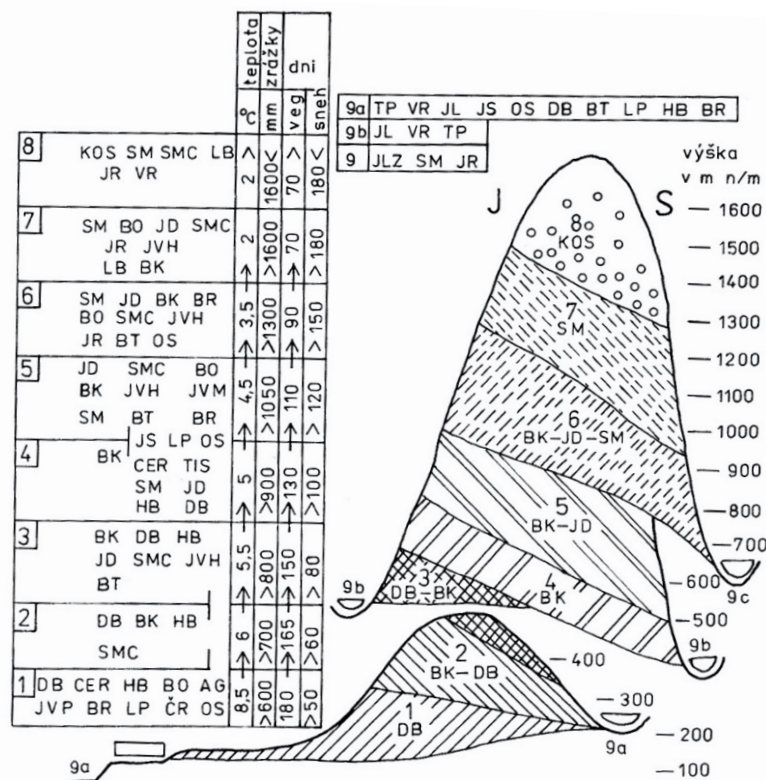
Obr. 2 Evidované kůrovcové dříví ve smrkových porostech v tis. m³ [4].

Navíc se pěstováním na nevhodném, pro smrk nepřírodném, stanovišti zhoršují jeho mechanické vlastnosti. Na těchto výživnějších stanovištích roste smrk rychleji než ve svém přirozeném prostředí. V případě větších ročních přírůstků narůstá jarní zóna dřeva při víceméně konstantní šířce zóny dřeva letního. Poměr mechanicky odolnějšího letního dřeva s vyšší objemovou hmotností se tak snižuje, tedy snižuje se celková objemová hmotnost. U dřeva platí, že mechanické vlastnosti úzce souvisí právě s objemovou hmotností dřeva. Mechanickými vlastnostmi dřeva se podle [20] rozumí vlastnosti dřeva z hlediska pevnosti a pružnosti.

Se zvětšováním objemové hmotnosti se zlepšují mechanické vlastnosti dřeva [7], [8]. Při vyšší objemové hmotnosti má dřevo vyšší pevnost, modul pružnosti E při všech způsobech namáhání, má i vyšší biologickou odolnost. Také platí, že čím vyšší je objemová hmotnost dřeva, tím bývá trvanlivější a odolnější [8]. Smrkové dřevo se postupně tedy stává méně odolným, méně trvanlivým a jeho mechanické vlastnosti se zhoršují.

2.1.2 Změny v druhové skladbě lesa v ČR

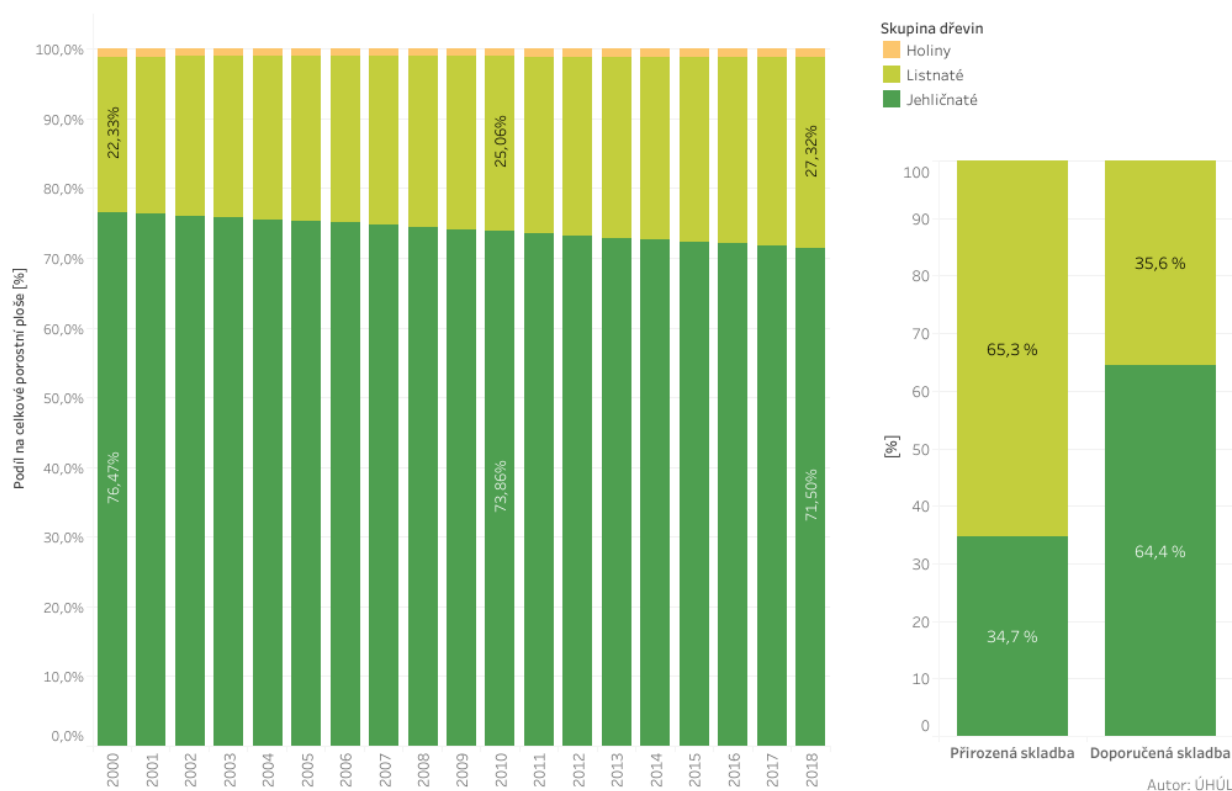
V přirozené skladbě lesa, tj. v přirozených podmínkách bez zásahu člověka, daných geologickou stavbou, přechodem subatlantického a kontinentálního klimatu a pestrými geomorfologiemi, odpovídají podmínkám České republiky v nižších nadmořských výškách převažující dubové a habrové lesy, které dále přecházejí v bukové a jedlové a smrkové porosty převažující až v nejvyšších polohách [5].



Obr. 3 Zastoupení dřevin v lesních vegetačních stupních (DB = dub, BK = buk, JD = jedle, SM = smrk, KOS = kosodřevina) [9].

Vlivem odpovědného lesního hospodaření dochází v posledních letech k pozitivnímu trendu změny druhové a věkové skladby lesů ČR [5]. Úsilí o dosažení optimální druhové skladby lesů je dlouhodobě podporováno cílenou dotační politikou státu [4].

Výsledkem trendu vedoucí ke zvýšení diverzity lesních porostů je postupná úprava skladby lesů směrem k doporučené skladbě lesa, kdy jsou jehličnaté monokultury nahrazovány přirozenými listnatými porosty. Při obnově lesa se v posledních letech stále více používají listnaté stromy (buk (*Fagus sylvatica*), dub (*Quercus*), javor (*Acer*), jeřáb (*Sorbus*)) na úkor jehličnatých (smrk (*Picea abies*), borovice (*Pinus sylvestris*)). Buk (*Fagus sylvatica*), dub (*Quercus*) a jedle (*Abies alba*) patří mezi meliorační a zpevňující dřeviny, které plní svou existenci v lesním ekosystému hned několik funkcí, např. se podílejí na zlepšování vodního režimu, vytvářejí příznivější mikroklima v lesních porostech či snižují náchylnost porostů ke kalamitám způsobeným škůdci. Tyto dřeviny tak významně přispívají k udržení stability lesa. Cílem probíhající změny ve skladbě lesa je tedy zvýšení stability lesních porostů a zvýšení jejich hodnoty ve vztahu k ochraně přírody o obnově stability celé krajiny [10], [5].



Obr. 4 Podíl jehličnatých a listnatých dřevin na celkové porostní ploše [11].

Postupně se zvyšuje plocha listnatých porostů, jak to indikují změny v zastoupení věkových stupňů u buku a dubu. Podíl listnáčů na celkové ploše lesů ČR pozvolna stoupá a podle [4] v roce 2017 tvořil 27 % z celkové plochy lesů. Vývoj podílu plochy listnatých lesů na celkové ploše je zřejmý z Obr. 4 a zastoupení jednotlivých dřevin je shrnuto v Tab. 1.

V lesích ČR se zvyšuje i zastoupení nejmladších porostů, což se projevuje i dlouhodobým zvyšováním podílu listnatých dřevin v českých lesích. Tyto trendy pak v budoucnosti budou

dále pokračovat a lze očekávat další nárůst zastoupení listnatých dřevin. V řádu několika desetiletí se to projeví v poklesu nabídky slabšího jehličnatého dříví, tak jak bude klesat jeho produkce v nižších věkových stupních [3].

Tab. 1 Vývoj podílu jednotlivých dřevin na celkové porostní ploše lesů ČR v % [12].

	1950	1980	2000	2005	2010	2015	2017
smrk	60,0	55,6	54,0	53,1	51,9	50,5	50,3
jedle	2,9	2,1	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1
borovice	21,2	19,2	17,6	17,4	16,8	16,7	16,3
modřín	1,5	2,2	3,8	3,8	3,9	3,9	3,8
ostatní jehličnaté	0,2	0,6	0,2	-	0,2	-	0,3
jehličnaté celkem	85,8	79,7	76,5	75,3	73,9	72,1	71,9
dub	3,6	5,5	6,3	6,6	6,9	7,1	7,2
buk	4,5	5,5	6,0	6,6	7,3	8,1	8,4
bříza	-	2,6	2,9	2,9	2,8	2,8	2,8
ostatní listnaté	4,4	6,5	7,1	7,4	8,1	9,5	8,6
listnaté celkem	12,4	19,6	22,3	23,4	25,1	27,5	27,0

Opačná situace nastane v nejbližších desetiletích u borovice a smrku, naší hlavní hospodářské dřeviny. Plocha mytních porostů bude po několik desetiletí klesat, což se odrazí velmi výrazně i v nabídce dřevní suroviny pro trh. Zejména u smrku je možno očekávat při zachování trendů velmi výrazné snížení nabídky, s výrazným dopadem na návazná zpracující odvětví, která jsou velkou měrou orientována právě na tuto dřevinu [3].

Trendy výrazných změn v nabídce dřevní suroviny poskytované vlastníky a správci lesa v blízké budoucnosti budou mít dlouhodobou a zvyšující se tendenci [3]. Pozitivní je dlouhodobé trvalé zvyšování celkových porostních zásob dřeva. Kromě růstu běžného přírůstu se na popsaném vývoji podílí také zvětšování podílů starších porostů [13].

Problémy plynoucí ze změny nabídky dřevní suroviny postihují i ostatní země střední Evropy. Například v Německu se přistoupilo k přeměně na odolnější smíšené lesy, které by měly lépe reagovat na případné změny klimatu. Již od roku 2010 se začal zejména vlivem četných polomů v plochách smrkových monokultur projevovat markantní pokles dodávek smrkového dřeva. Smrkového dřeva je v poslední době v Německu nedostatek, jeho cena velmi stoupla. Zároveň se němečtí pilaři potýkají s nedostatečným odbytem bukového dřeva [14].

V doporučené skladbě lesa podle [5] je z listnatých dřevin nejvíce zastoupen buk (*Fagus sylvatica*) s 18 % porostní plochy, dále dub (*Quercus*) s 9 %, lípa (*Tilia*), javor (*Acer*), habr (*Carpinus betulus*), bříza (*Betula pendula*) a jasan (*Fraxinus excelsior*), viz Tab. 2. Rozdíl mezi

přirozenou, současnou a doporučenou skladbou lesa, ke které se bude složení dřevin v budoucnu stále více blížit, je uvedeno v Tab. 2.

Tab. 2 Rekonstruovaná přirozená, současná a doporučená skladba lesa České republiky – podíl na celkové porostní ploše v % [5].

		současná skladba (2017)	přirozená skladba	doporučená skladba	očekávaná změna oproti 2017
jehličnaté	smrk	50,3	11,2	36,5	-13,8
	jedle	1,1	19,8	4,4	+3,3
	borovice	16,3	3,4	16,8	+0,5
	modřín	3,8	0,0	4,5	+0,7
	ostatní jehličnaté	0,3	0,3	2,2	+1,9
	jehličnaté celkem	71,9	34,7	64,4	-7,5
listnaté	buk	8,4	40,2	18,0	+9,6
	dub	7,2	19,4	9,0	+1,8
	bříza	2,8	0,8	0,8	-2,0
	olše	1,6	0,6	0,6	-1,0
	javor	1,5	0,7	1,5	0
	jasan	1,4	0,6	0,7	-0,7
	habr	1,3	1,6	0,9	-0,4
	lípa	1,2	0,8	3,2	+2,0
	jilm	0,0	0,3	0,3	+0,3
	ostatní listnaté	1,6	0,3	0,6	-0,8
	listnaté celkem	27,0	65,3	35,6	+8,6

Změny nabídky sortimentu dřevní suroviny bude do jisté míry odrážet i jeho cena. Lze očekávat nárůst ceny smrkového řeziva, neboť tato surovina bude v blízké budoucnosti nedostatečná, naopak cena listnatého, a zejména bukového, řeziva bude setrvale klesat.

2.1.3 Lesy v Evropské unii

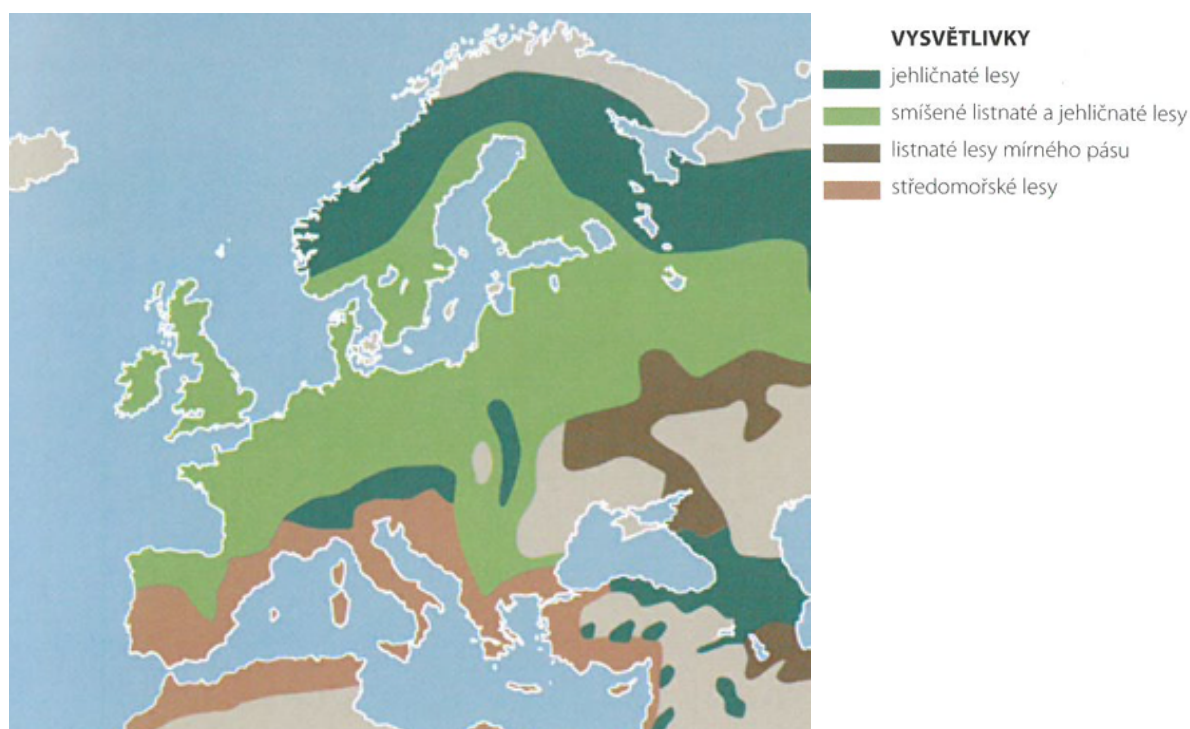
Lesy v Evropské unii se rozprostírají na ploše 182 milionů hektarů, tj. 5 % celkové rozlohy světových lesů, přičemž 2/3 celkové rozlohy lesů v Evropské unii se nacházejí na území šesti nejvíce zalesněných členských států: Švédska, Finska, Španělska, Francie, Německa a Polska. Srovnání lesní plochy a objemu celkové těžby České republiky a sousedních států je uvedeno v Tab. 3.

Přes 80 % porostní plochy lesů EU je využíváno k těžbě dřeva, které se využívá především v odvětví energetiky (42 % objemu), oproti tomu 24 % se využívá na pilách, 17 % v papírenském průmyslu a 12 % na výrobu dřevěných desek [15].

Tab. 3 Srovnání lesní plochy a objemu celkové těžby České republiky a sousedních států [15].

členský stát EU	lesní plocha (v tisících ha, 2015)	objem celkové těžby dřeva (v tis. m ³ , 2010)
Česká republika	2 667,4	16 183
Německo	11 419	55 613
Polsko	9 435	41 375
Rakousko	3 869	17 550
Slovensko	1 940	8 995

Přestože Evropská unie nemá v oblasti lesnictví žádnou společnou politiku a politika v oblasti lesního hospodářství tak spadá do pravomoci jednotlivých států [15], lze v rámci Evropy sledovat podobný vývoj skladby lesa. S poklesem produkce smrkového dřeva a růstem produkce dřeva listnatého, zejména bukového, se tak potýká nejen Česká republika, ale toto téma je již mnoho let aktuální také v Německu, Švýcarsku, Francii a dalších zemích střední Evropy. Rozložení listnatých, smíšených a jehličnatých lesů v Evropě je uvedeno na Obr. 5.

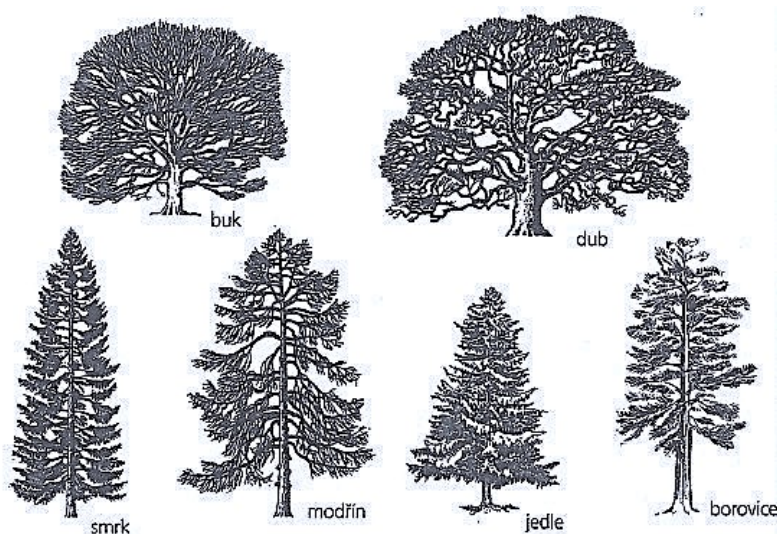


Obr. 5 Rozložení listnatých, smíšených a jehličnatých lesů v Evropě [16].

2.1.4 Přehled dřevin rostoucích na území České republiky podle jejich využití ve stavebnictví

Aktuálně je pro konstrukce používané dřevo jehličnaté, zejména smrkové, dřevo dřevin listnatých se používá minimálně. Obě tyto skupiny lze rozdělit na dřeviny tvrdé a měkké, mezi

nimiž není přesná hranice. Obecně lze říci, že jehličnaté dřeviny rostou rychleji, proto je jehličnaté dřevo měkkší, méně trvanlivé, ale také levnější [17].



Obr. 6 Přehled nejpoužívanějších dřevin ve stavebnictví obecně [18].

2.1.4.1 Smrk (*Picea abies*)

Smrkové dřevo se na dřevěné konstrukce používá nejčastěji. Smrk má měkké, poměrně lehké a pryskyřičné dřevo s dlouhými vlákny. Je smetanově bílé, nažloutlé až nahnědlé, hedvábně lesklé, s výraznými letokruhy, smolnaté, s pravidelnou stavbou a pevně zarostlými suky.



Obr. 7 Příčný řez smrkem [archiv autora].



Smrkové dřevo je dosti pružné a pevné, zasucha velmi dobře štípatelné. V suchu je velmi trvanlivé, ve vlhku rychle hnije. Poměrně málo se bortí a sesychá. Bývá napadáno dřevokazným hmyzem, zejména červotočem, proto je potřeba ho preventivně chránit.

Smrkové dřevo má velmi výhodné vlastnosti pro opracování. Je dobře štípatelné a snadno zpracovatelné, dobře se řeže, hobluje, frézuje, klíží, moří, natírá a barví. Je vhodné k lepení.

Používá se prakticky na všechny druhy stavebního řeziva – jako konstrukční dřevo i na stavebně truhlářské výrobky [17], [19]. Stavební smrkové řezivo je výborně dostupné u všech výrobců v ČR a jeho cena je v současnosti příznivá.

Smrkové dřevo se používá na všechny typy dřevěných konstrukcí (nosné i nenosné), buď jako výrobky z rostlého dřeva nebo výrobky na bázi dřeva, např. ve formě KVH, BSH, DUO/TRIO hranoly, CLT desky, a další).

Tab. 4 Přehled vlastností smrkového dřeva.

	<ul style="list-style-type: none"> • smrkové dřevo je měkké, • dobře opracovatelné (dobře se řeže, hobluje, frézuje, klíží, moří, natírá a barví, lepí), • poměrně houževnaté, pevné a pružné, • poměrně lehké (objemová hmotnost 350–400 kg/m³ [9]), • poměrně málo se bortí a sesychá, • v suchu je trvanlivé,
	<ul style="list-style-type: none"> • ve vlhku rychle hnije, • bývá napadáno dřevokazným hmyzem i houbami, nutná preventivní ochrana.

2.1.4.2 Modřín (*Larix decidua*)

Modřín má středně těžké, poměrně pružné a velmi trvanlivé polotvrdé dřevo. Na řezu je světle žluté barvy, stářím však červená, hnědne a tmavne. Obsahuje značné množství pryskyřice, ale méně než borovice, má výbornou trvanlivost jak v suchu, tak i ve vodě a vzdoruje poměrně dobře také střídání sucha a vlhka. Jeho dřevo je dobře opracovatelné. Je vhodný k použití tam, kde jsou vysoké požadavky na bezpečnost a trvanlivost, a také v místech s proměnlivou vlhkostí a teplotou, v minulosti se používalo na krovy velkých rozpětí [17], [20]. Používá se při výrobě nábytku, obložení stěn či jako stavební dřevo. Dříve se z něj též vyráběly bedny a kola. Modřín mírně praská a bortí se [21].

2.1.4.3 Jedle (*Abies alba*)

Jedle má dřevo podobných vlastností jako dřevo smrkové a stejně se i používá. Z hlediska pravidelnosti růstu je jedlové dřevo zpravidla lepší jakosti než dřevo smrkové, je šedobílé barvy někdy i narůžovělé, bez lesku [17], [19].

Jedlové dřevo je měkké, pružné, velmi dobře štípatelné a ohebné. Ve srovnání však nedosahuje jakosti dřeva smrkového, je náročnější na zpracování, ale je velmi dobře štípatelné. Má málo pryskyřice, a proto je méně trvanlivé než smrkové a borové dřevo. Poměrně hodně



sesychá. Zpracovatelnost dřeva je horší a pevnost nižší než u smrku. V suchu je jedlové dřevo velmi trvanlivé, méně odolné je v exteriéru. Vysoce trvanlivé je ve vodě [17], [19], [21].



Obr. 8 Příčný řez jedlí [archiv autora].

Jedlové dřevo bylo používáno ve stavebnictví zejména při výstavbě vodních děl, dále k výrobě šindelů, sudů apod. [17], [19].

Tab. 5 Přehled vlastností jedlového dřeva.

	<ul style="list-style-type: none">• jedlové dřevo je měkké,• poměrně pružné,• dobře opracovatelné, i když hůře než smrk,• lepší pravidelnost růstu než smrk,
	<ul style="list-style-type: none">• méně trvanlivé než smrk nebo borovice,• více sesychá než smrk, suky vypadávají a zahnívají, častěji se vyskytuje odlupčivost letokruhů, časem šediví až černá.

2.1.4.4 Borovice (*Pinus sylvestris*)





Obr. 9 Příčný řez borovicí [archiv autora].

Borovice má dřevo měkké, ale tvrdší než smrk, lehké až středně těžké, křehčí a málo pružné. Má vysoký obsah pryskyřice, proto je velmi trvanlivé i ve vlhku, zejména ve vodě. Proti smrku se hůře natírá, lakuje, lepí a moří [17].

Borové dřevo se ve stavebnictví používá tam, kde se požaduje odolnost vůči povětrnostním vlivům a hnilobě, např. pro výrobu oken, dveří, schodišť, kuchyňského nábytku, teras, obkladů, podvalů a polštářů do podlahy. Kvůli svým horším mechanickým vlastnostem a velké sukovitosti se nepoužívá na výrobu konstrukcí. Další použití borového dřeva je pro výdřevy v dolech, výrobu prachů, stavbu lodí, jako palivo a pro řezbářské zpracování.

Tab. 6 Přehled vlastností borového dřeva.

	<ul style="list-style-type: none"> • borové dřevo je měkké, • lehké až středně těžké (objemová hmotnost 500 kg/m^3 [9]) • má velkou odolnost proti vlhkosti (vysoký obsah pryskyřice),
	<ul style="list-style-type: none"> • silné zanášení nástrojů pryskyřicí při opracování, • mořidla i nátěry přijímá hůře než smrk, • jádrové dřevo se hůře lepí, • křehčí a méně pružné než smrkové (nedoporučuje se používat na ohýbané prvky), • velké suky, které se časem uvolňují.

2.1.4.5 Buk (*Fagus sylvatica*)

Buk je z listnatých dřevin u nás nejpoužívanější. Na řezu má světle hnědou barvu, narůžovělou až načervenalou. Velmi často se u buku vyskytuje nepravé jádro. Dřevo buku je stejnoměrně husté, póry jemné, vlákna kratší. Je poměrně tvrdé a těžké (asi 620 kg/m^3), ale měkčí než dřevo dubové. Je stejnorodé a husté a pevné. Dobře a čistě se obrábí, dobře se moří a lepí. Dřevo je dobře štípatelné, ale značně sesychá a praská. Trvanlivostí nevyniká, není-li vhodně impregnováno, odolává špatně vlivům vlhkosti. Rovněž špatně odolává biologickým škůdcům, zvláště houbám. V suchu a ve vodě je jeho trvanlivost vysoká [17], [19], [21].



Ve stavebnictví se používá na výrobu dých, překližek a parket. Jiné použití je zejména v nábytkářství na ohýbaný nábytek i na krájení dých, dále na výrobu železničních prachů či kuchyňského nářadí a jako palivo. V současné době se nepoužívá na nosní konstrukční prvky.



Obr. 10 Příčný řez bukem [archiv autora].

Dostupnost stavebního bukového řeziva je momentálně minimální, dostupné je spíše jako truhlářské řezivo, čemuž odpovídá i cena.

Tab. 7 Přehled vlastností bukového dřeva.

	<ul style="list-style-type: none"> • stejnorodé a husté, • poměrně pevné a pružné, • dobře a čistě obrábí, dobře se moří a lepí,
	<ul style="list-style-type: none"> • tvrdé, ale měkčí než dřevo dubové, • těžké (680 kg/m^3 [9]), • není příliš trvanlivé (vlhkost, biologičtí škůdci – zvláště houby), • hodně pracuje – bortí a sesychá.

2.1.4.6 Dub (*Quercus*)

Dub patří mezi nejrozšířenější domácí listnáče a jeho dřevo patří odedávna mezi jedno z nejžádanějších.

Dubové dřevo má žlutohnědou barvu. Má úzkou běl světlehnědé až světle šedé barvy a široké jádro zbarvené stejnoměrně hnědě až šedohnědě [19]. Dub má tvrdé, těžké, velmi pevné a pružné dřevo, dobře štípatelné a vysoce trvanlivé. Má velkou pevnost v tlaku i tahu, z našich dřev nejdéle vzdoruje nejen povětrnostním podmínkám, ale i střídání vlhka a sucha. V trvalém vodním uložení dosahuje časem vlastnosti blížíící se kameni, ovšem po vystavení vzdušnému prostředí se velice rychle rozpadá [17]. Dobře se lepí i moří. Dubové dřevo se dobře obrábí [21].



Obr. 11 Příčný řez dubem [archiv autora].

Dubové dřevo má široké uplatnění. Bylo v minulosti hojně používáno na zakládání staveb, ve vodním stavitelství, zakládání pod vodou, piloty k mostům, lávky, podlahy. Používá se na výrobu nábytku a podlah, dělají se z něj jakostní vlysy a náročné stavebně truhlářské výrobky, terasová prkna, schody apod. Využívalo se na nábytek v masivu i na krájení dýh. Je velmi vhodným dřevem pro výrobu dřevěných hmoždíků, kolíků, klínů apod.

Další použití dubu bylo pro mlýnská kola, hamry, sudy a je žádaným materiálem v řezbářství a sochařství [17], [19], [21].

Tab. 8 Přehled vlastností dubového dřeva.

	<ul style="list-style-type: none"> • velká pevnost v tlaku a tahu, pružné, • trvanlivé (vysoký obsah tříslovin), • dobře se lepí a moří, • výborná odolnost povětrnostním podmínkám a střídání vlhka a sucha, • dobrá odolnost proti ohni,
	<ul style="list-style-type: none"> • tvrdé a těžké ($640\text{--}650\text{ kg/m}^3$ [9]).

2.1.4.7 Ostatní listnaté dřeviny

Dřevo z ostatních druhů listnatých dřevin se na stavební konstrukce prakticky nepoužívá, výjimkou může být akátové dřevo, které je vhodné k použití v exteriéru.

Jasan, javor, bříza a lípa se používají na truhlářské a řezbářské práce [17]. Další ve stavebnictví užívané dřeviny jsou z exotických stromů.

2.2 Stavba a vlastnosti klimatolerantních dřevin

Klimatolerantní dřeviny jsou dřeviny, které se přirozeně vyskytují v daném prostředí, nebo by se v něm vyskytovaly nebýt zásahu člověka. Jedná se o dřeviny, které odpovídají přirozené skladbě lesa popsané v kapitole 2.1.2. V České republice se jedná zejména o listnaté dřeviny.

2.2.1 Srovnání vnitřní stavby listnatých a jehličnatých dřevin

Ve stavbě listnatého dřeva lze pozorovat oproti stavbě nejčastěji ve stavebnictví používaného jehličnatého dřeva zásadní rozdíly z makroskopického i mikroskopického pohledu. Tyto rozdíly způsobují rozdílné chování dřeva, zejména jejich rozdílné fyzikální a mechanické vlastnosti a chování dřeva při změnách vlhkosti.

Dřevo listnatých dřevin má oproti jehličnatým dřevinám, jež se skládají pouze ze dvou typů anatomických elementů, složitější stavbu, obsahuje cévy (tracheje), cévice (tracheidy), libriformní buňky (dřevní vlákna) a parenchymatické buňky. Liší se rovněž podíl jednotlivých anatomických elementů ve stavbě dřeva [9].

Znalost chemické a mikroskopické stavby dřeva je nezbytná pro pochopení makroskopické stavby dřeva a ta pro porozumění podstatě rozdílů vlastností mezi jednotlivými druhy. Uchopení této podstaty usnadňuje výběr vhodné dřeviny pro daný účel využití či naopak co nejlepšího využití dané dřeviny a volbu optimální technologie jejího zpracování.

2.2.1.1 Srovnání chemické skladby jehličnatých a listnatých dřevin

Dřevo lze charakterizovat jako organický, nehomogenní, anizotropní a hygroskopický materiál [19]. Dřevo se vyznačuje diferencovanou strukturou a specifickými vlastnostmi [8]. Dřevní hmota je tvořena organickými a anorganickými látkami. Převážnou část dřevní hmoty tvoří látky organické.

Jakkoli jsou anatomické elementy jehličnanů a listnáčů různorodé, výzkum elementárního složení různých druhů dřeva ukazuje, že chemické složení suchého dřeva je u všech dřevin přibližně stejné. Průměrně se podle [22] udává 49,5 % uhlíku, 44,2 % kyslíku a 6,3 % vodíku. Kromě toho ještě dřevo obsahuje 0,12 % dusíku a dalších prvků stopového množství [22].

Rozdíl mezi chemickou skladbou jehličnatých a listnatých dřevin spočívá v rozdílném obsahu hlavních složek a rovněž v jejich rozdílné skladbě.

Listnaté dřeviny obsahují dle [21] oproti jehličnatým průměrně méně celulózy, více hemicelulóz a méně ligninu, jak je uvedeno v Tab. 9.

Tab. 9 Zastoupení hlavních složek podle dřevin [21].

hlavní složky	listnaté dřeviny (%)	jehličnaté dřeviny (%)
celulóza	46–48	48–56
hemicelulóza	26–35	23–25
lignin	15–28	26–35

Dřevo jehličnatých a listnatých dřevin se liší nejen obsahem hemicelulóz, ale také jejich skladbou [22]. Zatímco jehličnaté dřevo obsahuje převážně hexozany, listnaté dřevo obsahuje pentozany. Rozdíl mezi těmito hemicelulózami spočívá v obsahu atomů uhlíku v molekule cukru. Rovněž struktura ligninu je ve stavbě jehličnatých a listnatých dřevin rozdílná.

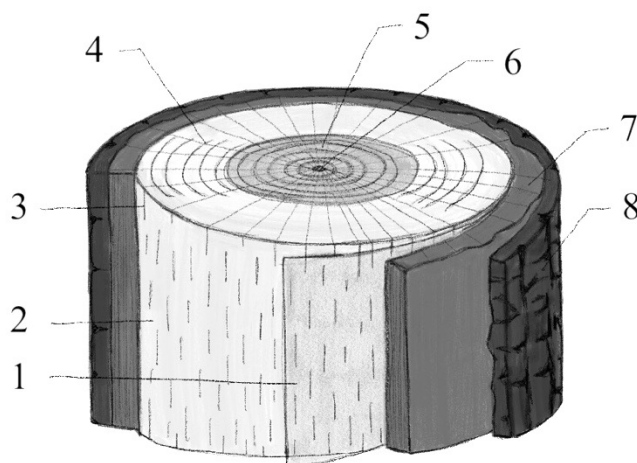
2.2.1.2 Srovnání makroskopické stavby dřeva jehličnatých a listnatých dřevin

Makroskopickou stavbu dřeva lze definovat jako strukturu dřeva viditelnou pouhým okem. Je významným prvkem pro určování typu dřeva, rozlišení vad dřeva, jakostního třídění a má vliv i na vlastnosti dřeva, zejména mechanické a fyzikální a na zpracování dřeva. Makroskopická stavba se projevuje na řezu dřevem tzv. texturou [23].

Dřevo tvoří centrální část kmene, větví a kořenů dřevin, a podle [24] zaujímá asi 70–93 % objemu stromu. Při makroskopickém pohledu na jednotlivé řezy dřeva lze podle [24] pozorovat následující strukturální části, které se však nemusí vyskytovat u každého druhu:

- běl, jádro, vyzrálé dřevo,
- letokruhy, cévy,
- dřeňové paprsky,
- dřeň, kambium, lýko, kůra,
- ostatní.

Popis jednotlivých částí makroskopické stavby dřeva není předmětem této práce a lze jej nalézt v literatuře, např. v [8], [9], [23], [24], [25], [26], [27], [28]. Schematický náčrtek částí kmene je zobrazen na Obr. 12.



Obr. 12 Schematický nákres částí kmene; 1 – kambium, 2 – běl, 3 – dřeňové paprsky, 4 – letokruh, 5 – jádro, 6 – dřeň, kůra se skládá ze 7 – lýka a 8 – borka [24].

Makroskopická struktura jehličnatých a listnatých dřevin je v hrubých rysech stejná, obě skupiny mají ve své makroskopické stavbě shodné hlavní strukturální části (dřeň, jádro, běl, dřeňové paprsky, kambium, kůra) [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Při podrobnějším pohledu se ovšem ve stavbě jehličnatých a listnatých dřevin nacházejí značné rozdíly. Jedná se zejména o letokruhy, jež jsou u různých druhů dřevin výrazně i strukturně odlišné. Jehličnaté dřevo se vyznačuje výrazným rozdílem mezi jarním a letním dřevem, a to jak v barvě, tak v tvrdosti a objemové hmotnosti, mívá vyšší podíl jarního dřeva a u některých jehličnatých dřevin se vyskytují pryskyřičné kanálky [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Oproti tomu dřevo listnatých dřevin má typické elementy, jimiž jsou cévy, které tvoří charakteristickou texturu a strukturu zejména u kruhovitě cévnatých dřevin. Cévy pozorujeme na příčném řezu jako póry. Na základě rozměrů cév a jejich umístění ve dřevě se pak dřeva listnatých dřevin dělí do tří skupin: na kruhovitě pórovité, polokruhovitě pórovité a roztroušeně pórovité dřevo [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Další rozdíl tkví v hustotě a počtu dřeňových paprsků. Všechny jehličnaté dřeviny (a některé listnaté) mají velmi úzké dřeňové paprsky makroskopicky prakticky nezřetelné. Naproti tomu naše nejrozšířenější listnaté dřeviny dub a buk mají široké dřeňové paprsky, které jsou makroskopicky pozorovatelné na všech řezech. Ostatní listnaté dřeviny mohou mít úzké, nepravé dřeňové paprsky či dřeňové skvrny [23], [24], [25], [26], [27], [28].

2.2.1.3 Srovnání mikroskopické struktury jehličnatého a listnatého dřeva

Znalost mikroskopické stavby dřeva je nezbytná pro pochopení makroskopické stavby dřeva a podstaty rozdílů vlastností mezi jednotlivými druhy. Usnadňuje výběr vhodné dřeviny pro daný účel využití a volbu optimální technologie zpracování [29].

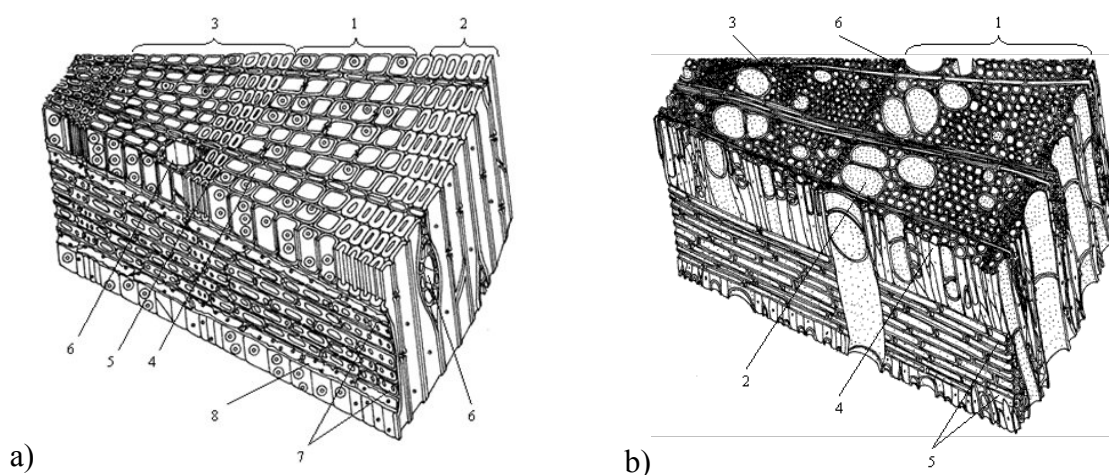
Základem stavby dřeva jsou rostlinné buňky spojené do pletiva, kde mají vodivou a zpevňující funkci (buňky prosenchymatické) a funkci zásobní a vyživovací (buňky parenchymatické) [30].

Dřevo se skládá z buněk, které v průběhu života stromu plní různé funkce. Podle jejich funkcí rozlišujeme tři typy buněk [31]:

- parenchymatické buňky – vyživovací vodivé a zásobní buněčné elementy,
- sklerenchymatické buňky – vyztužovací buněčné elementy,
- cévy – vodivé buněčné elementy (tracheje – pravé cévy, tracheidy – cévice).

Z hlediska zastoupení jednotlivých typů buněk ve dřevě, i z hlediska složitosti mikroskopické (anatomická) stavby dřeva dělíme dřeviny na jehličnaté a listnaté. Srovnání mikroskopické stavby jehličnatého a listnatého dřeva schematicky znázorňuje Obr. 13.

Výsledkem diferenciací anatomických elementů dřeva jsou pak u jehličnanů tracheidy a parenchymatické buňky. U listnáčů jsou to cévy, tracheidy cévovité, vláknité a vazicentrické, libriformní vlákna a parenchymatické buňky [30].



Obr. 13 Prostorové znázornění anatomické stavby a) jehličnatého dřeva: 1 – jarní dřevo, 2 – letní dřevo, 3 – letokruh, 4 – jarní tracheida s dvojtečkami, 5 – letní tracheida, 6 – pryskyřičný kanálek, 7 – dřevový paprsek, 8 – příčná tracheina; b) listnatého dřeva, 1 - letokruh, 2 - jarní céva, 3 - letní céva, 4 - libriformní vlákno, 5 - dřevový paprsek, 6 - podélný parenchym [9].

Dřevo listnatých dřevin je vývojově mladší než dřevo jehličnatých dřevin. Má ve srovnání s jehličnany složitější strukturu a je tvořeno větším počtem různých druhů anatomických elementů. Tyto elementy mají rozdílnou velikost, větší tvarovou rozmanitost a tvoří typické pravidelné radiální řady. Podrobný popis jednotlivých elementů mikroskopické stavby jehličnatých a listnatých dřevin lze nalézt v odborné literatuře, např. [9], [30], [31].

Zastoupení anatomických elementů v závislosti na druhu dřeviny je znázorněno v Tab. 10.

Tab. 10 Zastoupení anatomických elementů v závislosti na druhu dřeviny.

	jehličnaté dřeviny	listnaté dřeviny
cévy	–	různě podle druhu dřeviny
tracheidy (cévice)	90–95 %	různě podle druhu dřeviny, nemusí se vyskytovat
parenchymatické buňky	5–10 %	7–35 %
– dřeňové paprsky	cca 7 %	cca 18 %
libriformní vlákna	–	různě podle druhu dřeviny, průměrně 50–60 %

Zásadním rozdílem ve struktuře listnatých dřevin oproti jehličnatým dřevinám je výskyt cév (trachejí), které jsou charakteristickým skladebným prvkem listnatých dřevin a tvoří až 75 % objemu dřevní hmoty. Na rozdíl od ostatních buněk, jejichž výskyt ve struktuře jednotlivých druhů dřevin je téměř univerzální, jsou tracheje buněčným prvkem, který se vyskytuje pouze u dřeva listnatých dřevin [19].

Tracheidy (cévice) jsou anatomické elementy vyskytující se ve skladbě listnatých i jehličnatých dřevin. Zatímco u jehličnatých dřevin tvoří tracheidy až 95 % struktury dřeva, jejich zastoupení u listnatých dřevin je různé, někde tvoří velkou část dřeva, jinde nejsou vůbec přítomny [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Tracheidy plní ve dřevě funkci vodivou i mechanickou (vyztužovací), u listnatých dřevin někdy i zásobní. Vodivou funkci plní u jehličnatých dřevin převážně jarní tracheidy, u dřevin listnatých jsou to cévovité tracheidy doprovázející cévy a vazicentrické tracheidy, rovněž se vyskytující ve styku s cévami. Vyztužující funkci plní u jehličnatých dřevin tracheidy letní, u listnatých dřevin vláknité tracheidy, jež tvoří přechodný typ mezi tracheidou a libriformním vláknem. Ve dřevě jehličnanů se mohou kromě vertikálně orientovaných tracheid vyskytovat i horizontálně orientované tzv. příčné (ležaté) tracheidy, které jsou součástí dřeňových paprsků [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Tab. 11 Rozdělení anatomických elementů dřevin podle jejich funkce.

funkce	jehličnaté dřeviny	listnaté dřeviny
vodivá	jarní tracheidy	cévy cévovité tracheidy vazicentrické tracheidy
	parenchymatické buňky	parenchymatické buňky (dřeňové paprsky)
mechanická (vyztužovací)	letní tracheidy	libriformní vlákna vláknité tracheidy
zásobní	parenchymatické buňky (axiální parenchym, pokud se vyskytuje)	parenchymatické buňky (axiální parenchym i dřeňové paprsky)

Listnaté dřeviny mají pro mechanickou (vyztužovací) funkci úzce specializované elementy – libriformní vlákna. Jejich podíl ve dřevě je u různých druhů dřevin rozdílný, v průměru tvoří 50–60 %, někde až 75 %, jinde jen 36 % z celkového objemu dřeva [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Parenchymatické buňky se ve dřevě listnatých dřevin vyskytují v mnohem větším zastoupení než ve dřevě jehličnanů a také tvarově jsou rozmanitější. V listnatých dřevinách se udává jeho zastoupení v rozmezí 8–35 %, zatímco u jehličnatých je to pouze 5–10 %. Parenchymatické buňky slouží k vedení a ukládání zásobních látek. Parenchymatické buňky mohou být ve dřevě uloženy ve směru podélné osy kmene či ve směru kolmém na osu kmene. Ve směru podélné osy kmene tvoří parenchymatické buňky podélný (axiální) dřevní parenchym, u některých jehličnatých dřevin navíc i pryskyřičné kanálky. Ve směru kolmém na osu kmene tvoří parenchym radiální neboli dřeňové paprsky. Ve dřevě jehličnanů navíc horizontálních pryskyřičných kanálků (jež se rovněž vyskytují u některých tropických listnatých dřevin) a podélného parenchymu. Parenchymatické buňky se dále podílí na stavbě hojivého parenchymu vznikajícího při poranění kambia [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Dalším hlavním skladebným prvkem dřeva jsou dřeňové paprsky, které u jehličnatých dřevin tvoří přibližně 7 % a u listnatých dřevin přibližně 18 % z celkového objemu dřevní hmoty. Dřeňové paprsky jsou pletiva skládající se převážně z horizontálně uspořádaných buněk [19]. Ve dřevě mají vodivou funkci a dále slouží pro ukládání zásobních látek.

Dřeňové paprsky jehličnatých dřevin mohou být buď vystavěné pouze z parenchymatických buněk nebo být tvořené parenchymatickými buňkami a příčnými tracheidami. Dřeňové paprsky listnáčů jsou tvořeny z různě mohutných seskupení parenchymatických buněk. Na rozdíl od

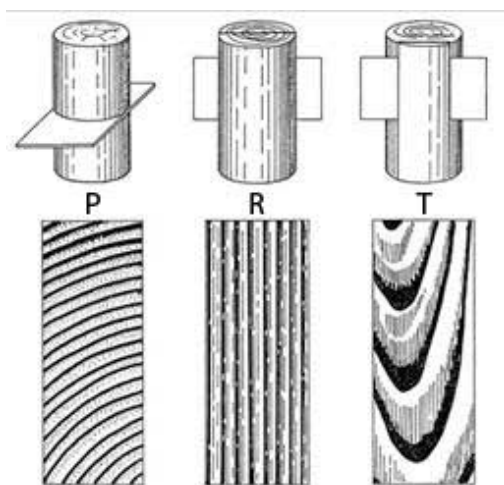
jehličnanů jsou dřevné paprsky listnáčů většinou vícevrstevné a jsou tvořeny morfologicky odlišnými buňkami [23], [24], [25], [26], [27], [28].

Další rozdíl je možno nalézt v mezibuněčných propojeních zabezpečujících transport vody a živin – ztenčenin. Jedná se zejména o dvojtečky. Dvojtečky listnáčů jsou menší a mnohem početnější než u jehličnatých dřevin. v jejich střední části na rozdíl od jehličnanů není vyvinutý torus a jejich membrána je podobně kompaktní jako u teček [23], [24], [25], [26], [27], [28].

2.2.1.4 Srovnání mikroskopické struktury jehličnatých a listnatých dřevin na charakteristických řezech

Dřevo má válcově-kuželovitou stavbu, která se definuje ve třech základních řezech a směrech. Mezi základní řezy kmene podle [31] patří (viz Obr. 14):

- příčný řez P, který je kolmý k ose kmene a je charakteristický soustředným uspořádáním letokruhů,
- radiální řez R, který je veden středem kmene,
- tangenciální řez T, který je veden rovnoběžně s osou kmene v určité vzdálenosti od středu kmene.

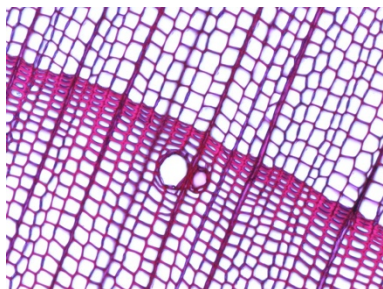


Obr. 14 Schematické znázornění základních řezů kmenem, P – příčný (transversální) řez, R – radiální řez, T – tangenciální řez [31].

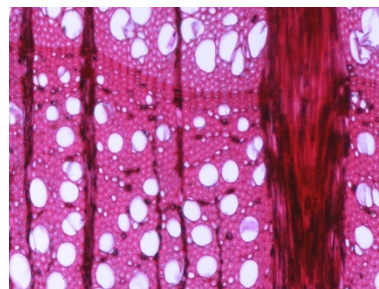
Příčný řez

Na příčném řezu jehličnatými dřevinami je jasně zřetelný rozdíl mezi jarním a letním dřevem, přechod mezi nimi může být pozvolný, např. u smrku (Obr. 15), nebo ostrý, např. u jedle, borovice, či modřínu [9], [25], [27], [29], [31].

Pravidelné uspořádání parenchymatických buněk jehličnatého dřeva narušují vertikální pryskyřičné kanálky, které jsou typické pro dřevo některých jehličnatých dřevin např. borovice, modřínu a smrku (Obr. 15). Vertikální pryskyřičné kanálky procházejí rovnoběžně s podélnou osou kmene a na příčném řezu tvoří kruhové otvory obklopené třemi vrstvami parenchymatických, tzv. epitelových, buněk [9], [25], [27], [29], [31].



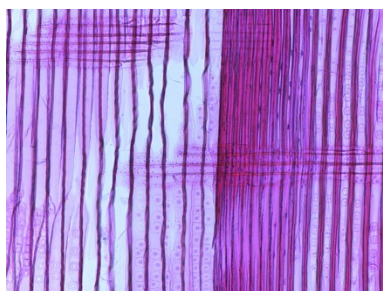
Obr. 15 Smrk, příčný řez [29].



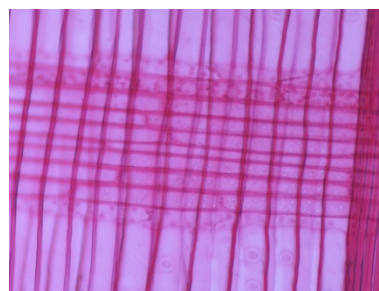
Obr. 16 Buk, příčný řez [29].

Složitější struktura listnatého dřeva se na příčném řezu výrazně projeví. Nejzřetelnějším prvkem jeho struktury jsou cévy, a to zejména cévy jarní, které jsou mnohem větší než cévy letní. Pozorujeme rovněž rozdíl mezi jarním a letním dřevem. Podle uspořádání pórů na příčném řezu lze rozdělit listnaté dřeviny na kruhovitě, polokruhovitě a roztroušeně pórovité. Buk (Obr. 16) patří mezi listnaté dřeviny roztroušeně pórovité [9], [25], [27], [29], [31].

Radiální řez



Obr. 17 Smrk, radiální řez [29].



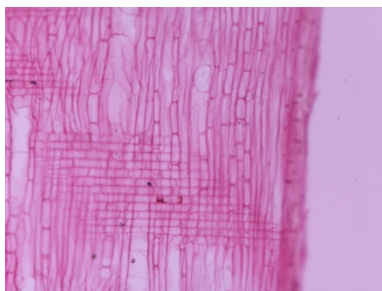
Obr. 18 Smrk, radiální řez [29].

Na radiálním řezu jehličnatých dřevin jsou patrné dřeňové paprsky, jež vytvářejí typické plochy se zřetelnými parenchymatickými buňkami, případně s příčnými tracheidami. Místo styku vertikálních tracheid s parenchymatickými buňkami dřeňových paprsků se označuje jako křížové pole. Na stěnách jarních tracheid jsou zřetelné i ztenčeniny. Na radiálním řezu jsou patrné nejvýznamnější diagnostické znaky jehličnatých dřevin: rozlišení homocelulárních

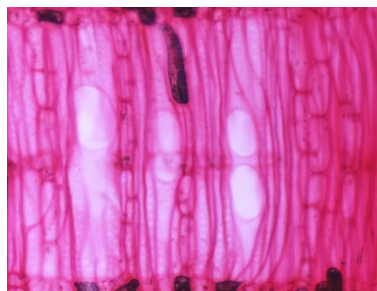
a heterocelulárních dřeňových paprsků a tvar a počet ztenčenin v křížovém poli [9], [25], [27], [29], [31].

Na radiálním řezu listnatými dřevinami pozorujeme zejména dřeňové paprsky a jejich výšku. Dřeňové paprsky listnatých dřevin mohou být homogenní (vystavěné ze stejného typu buněk, tyto dřeňové paprsky má většina listnáčů, např. dub (Obr. 19)), nebo heterogenní (tvořeny různou kombinací buněk). Některé dřeviny mají dřeňové paprsky obojího typu, např. buk (Obr. 22), nebo habr [9], [25], [27], [29], [31].

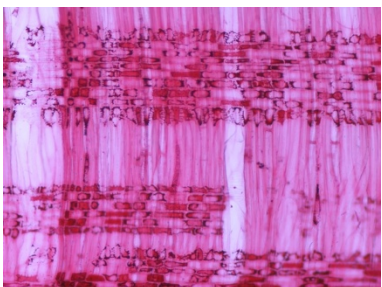
Při větším zvětšení pozorujeme na radiálním řezu i typ perforace buněčné stěny. Perforaci jednoduchou má např. dub (Obr. 20), akát, habr, javor a další, perforaci žebříčkovou má např. olše či bříza. Některé dřeviny mají perforaci jednoduchou i žebříčkovou, např. buk (Obr. 22) [9], [25], [27], [29], [31].



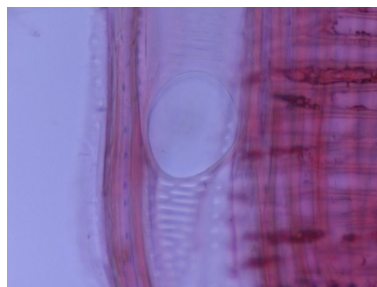
Obr. 19 Dub, radiální řez [29].



Obr. 20 Dub, radiální řez [29].



Obr. 21 Buk, radiální řez [29].

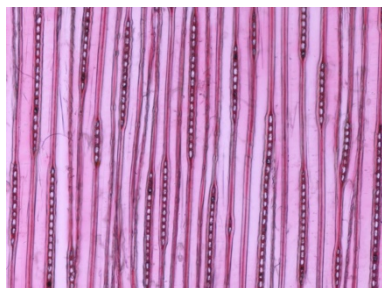


Obr. 22 Buk, radiální řez [29].

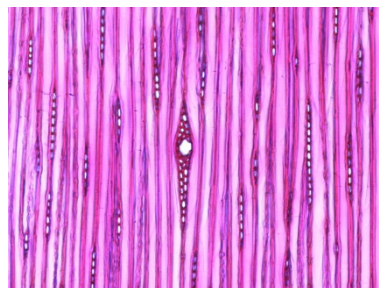
Tangenciální řez

Na tangenciálním řezu lze pozorovat dřeňové paprsky, jež mají oválný tvar a formují zde typická jednovrstevná (např. jedle, Obr. 23) nebo vícevrstevná (např. smrk, Obr. 24) vřetena. Vrstevnatostí se označuje jejich šířka, tedy počet buněk ve směru kolmém na podélnou osu kmene [9], [25], [27], [29], [31].

Ve směru kolmém na podélnou osu kmene jsou ve dřevných paprscích uloženy horizontální pryskyřičné kanálky. Na tangenciálním řezu jsou viditelné jako otvůrky obklopené dvěma vrstvami epitelových buněk uprostřed větven vícevrstevných dřevných paprsků [27].

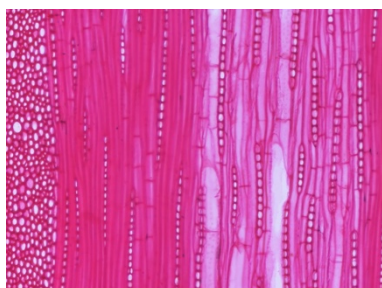


Obr. 23 Jedle, tangenciální řez [29].

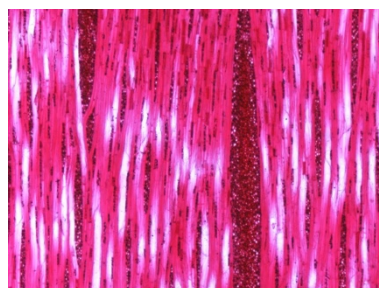


Obr. 24 Smrk, tangenciální řez [29].

Na rozdíl od jehličnanů jsou dřevné paprsky listnáčů většinou vícevrstevné. Některé z nich mají dřevné paprsky 1–mnohvrstevné, jako např. dub (Obr. 25), buk (Obr. 26). Některé dřeviny mají dřevné paprsky sdružené (habr, olše) [9], [25], [27], [29], [31].



Obr. 25 Dub, tangenciální řez [29].



Obr. 26 Buk, tangenciální řez [29].

2.2.2 Srovnání vybraných fyzikálních a mechanických vlastností listnatých a jehličnatých dřevin

Rozdílná struktura a makro- i mikroskopická stavba jehličnatých a listnatých dřevin zapříčiňují rozdíl mezi jejich fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Pro porovnání vlastností byly vybrány dřeviny, které mají ve skladbě lesa ČR významnou porostní plochu a mohly by tedy být uvažovány jako případně využitelné ve stavebnictví. Jako referenční dřevina byla vybrána v současnosti nejvíce používaná dřevina ve stavebnictví – smrk.

Srovnávány jsou tyto dřeviny:

- smrk ztepilý (*Picea abies*),
- buk obecný (*Fagus sylvatica*),
- dub letní (*Quercus robur*),

- habr obecný (*Carpinus betulus*),
- javor mléč (*Acer platanoides*),
- lípa srdčitá (*Tilia cordata*).

Srovnávány byly takové vlastnosti, které mají vliv na uvažované použití dřeva těchto dřevin v konstrukcích pozemních staveb, tedy jako nosné prvky. Srovnávány jsou tyto vlastnosti:

- objemová hmotnost,
- tvrdost, opracovatelnost,
- sesychání,
- pevnost v tlaku, pevnost v ohybu,
- modul pružnosti v ohybu.

2.2.2.1 Fyzikální vlastnosti

Objemová hmotnost

Objemová hmotnost dřeva závisí na množství vody, které obsahuje. Obecně je pro lepší manipulaci se stavebními prvky na staveništi výhodnější, pokud mají nižší hmotnost. Na druhou stranu se podle [20] a [8] zvětšováním objemové hmotnosti zlepšují nejen mechanické vlastnosti dřeva, tj. pevnosti, moduly pružnosti atd., ale dřevo o větší objemové hmotnosti má i vyšší biologickou odolnost.

Srovnání známých hodnot je provedeno v Tab. 12. Srovnávané listnaté dřeviny mají všechny vyšší objemovou hmotnost než smrk; nejnižší objemovou hmotnost z nich má javor, nejvyšší habr, který je srovnatelný s dubem, buk má o něco málo nižší objemovou hmotnost než dub.

Tab. 12 Objemová hmotnost dřeva v kg/m^3 při vlhkosti 0 % [9], [28].

		smrk	buk	dub	habr	javor	lípa
z odborné literatury	[9]	392	684	696	697	526	–
	[28]	430	680	650	790	620	430

Tvrdost, opracovatelnost

Měkké dřevo se snáze opracovává, získává se z většiny našich jehličnanů a některých listnatých stromů (lípa, topol nebo vrba), zatímco trvanlivější tvrdé dřevo pochází především z listnáčů. Tvrdost lze definovat jako odpor proti trvalé plastické deformaci materiálu. Tvrdost má význam při opracování řeznými nástroji a stanovuje se několika způsoby [9].

Tvrдост podle Brinella se určuje podle průměru jamky, vzniklé vtlačením ocelové kuličky o průměru 10 mm do dřeva, a síly, kterou byla kulička do dřeva vtlačována. Tvrдост podle Janky odpovídá síle, která byla třeba k vtlačení ocelové kuličky o průměru 11,28 mm do poloviny své výšky [9].

Opracovatelnost lze vyjádřit jako míru obtížnosti zpracování dřeva a to, jak výrazný má vliv na otupení nástrojů. Tato kategorie je dle [16] hodnocena kvalitativně, pro hodnocení je použita stupnice 1 až 10, přičemž hodnota 1 je přiřazena dřevu s výbornou opracovatelností, zatímco hodnota 10 dřevu velmi těžko opracovatelnému.

Buk a javor jsou řazeny mezi dobře opracovatelné dřeviny mírně otupující nástroje, proto byly podle [16] hodnoceny hodnotou 6, u dubu je opracovatelnost hodnocena jako dostatečná, čemuž odpovídá hodnota 8, dřevo habru je obtížně opracovatelné, otupuje nástroje, proto je habr hodnocen hodnotou 9. Smrkové dřevo se opracovává snadno, čemuž odpovídá hodnota 3 [16]. Srovnání tvrdostí a opracovatelnosti dle literatury je shrnuto v Tab. 13.

Tab. 13 Opracovatelnost a tvrdost dřeva – srovnání hodnot dostupných v literatuře; P = čelní tvrdost, R = radiální tvrdost, T = tangenciální tvrdost.

	smrk	buk	dub	habr	javor	lípa
opracovatelnost [16]	3	6	8	9	6	1
tvrdost podle Brinella v MPa [9]	P 19,6	P 66,8	P -	P 60,5	P -	
	R 14,7	R 26,8	R -	R 27,1	R -	–
	T 6,8	T 30,4	T –	T 29,5	T -	
tvrdost podle Janky v kg/cm ² [28] – pro $\omega = 11\%$	P 170	P 640	P 450	P 670	P 520	P –
	T 280	T 540	T 420	T 750	T 570	T 170
tvrdost (slovně) [16]	měkká	středně tvrdá	středně tvrdá	tvrdá	středně tvrdá	měkká

Sesychání

Sesychání je definováno jako zmenšování rozměrů dřeva způsobené snižováním jeho vlhkosti [32]. V důsledku anizotropní struktury dřeva jsou výrazné rozdíly v sesychání a bobtnání dřeva v tangenciálním a radiálním směru. Ty jsou příčinou tvarových změn dřevěných prvků. Podle [20] dochází vlivem sesychání ke vzniku povrchových trhlin především u velkých prvků.

Hodnoty sesychání jednotlivých druhů dřeva byly převzaty z odborné literatury [28], [9], a [33] a jsou shrnuty v Tab. 14, kde * značí americké druhy blízké srovnávaným druhům:

^{*1}American beech (buk velkolistý, *Fagus grandifolia*), ^{*2}Oak red (dub červený, *Quercus rubra*),
^{*3}Maple Bigleaf (javor velkolistý, *Acer macrophyllum*).

Tab. 14 Sesychání od čerstvého k suchému stavu vyjádřené v % z rozměrů dřeva v čerstvém stavu.

		smrk	buk	dub	habr	javor	lípa
sesychání podél vláken	[28]	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3
α_l	[9]	0,65	0,3	–	–	–	–
sesychání radiální α_r	[28]	2,4	5	4,0	6,8	3,2	5,5
	[9]	4,3	5,3	–	6,7	–	–
	[33]	4,1	5,5 ^{*1}	4,4 ^{*2}	-	3,7 ^{*3}	
sesychání tangenciální	[28]	5,0	11,8	7,8	11,5	8,4	9,1
α_t	[9]	9,8	12,5	–	11,1	–	–
	[33]	6,8	11,9 ^{*1}	11,1 ^{*2}	-	7,1 ^{*3}	
sesychání objemové α_V	[28]	8,0	17,5	12,6	19,7	12,5	14,4
	[9]	-	17,5	13,7	16,9	10,3	–
	[33]	11,3	17,2 ^{*1}	15,1 ^{*2}	–	11,6 ^{*3}	–

Z Tab. 14 je zřejmé, že největší rozměrovou stabilitu ze všech uvedených dřevin vykazuje smrk. Sesychání smrku je oproti buku téměř poloviční. Největší sesychání však vykazuje habr, jeho hodnoty jsou oproti smrku více než dvojnásobné. Největší objemové sesychání vykazuje habr s hodnotou 19,7 %. Nejméně sesychavé jsou dřeva javoru a dubu s hodnotami 12,5 a 12,6 % [28].

2.2.2.2 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanickými vlastnostmi dřeva se podle [20] rozumí vlastnosti dřeva z hlediska pevnosti a pružnosti. Mechanické vlastnosti dřeva závisejí na charakteru zatížení (statické, dynamické, rázové) a na trvání zatížení (stálé, dlouhodobé, střednědobé, krátkodobé). Mechanické vlastnosti dřeva se většinou zjišťují statickými zkouškami na zkušebních tělesech podle příslušných norem. Mechanické vlastnosti dřeva ovlivňuje řada činitelů: konstrukční rozměr (se zvětšováním konstrukčních rozměrů prvků dochází ke zhoršení mechanických vlastností dřeva), objemová hmotnost (se zvětšováním objemové hmotnosti se zlepšují mechanické vlastnosti dřeva), vlhkost dřeva (se zvyšováním vlhkosti dřeva do meze nasycení vláken (30 %) se jeho mechanické vlastnosti zhoršují), vady dřeva (zhoršují především pevnost dřeva), rychlost zatěžování (se zvyšováním rychlosti zatěžování se zvětšuje pevnost dřeva) a doba trvání zatížení (s prodlužováním doby trvání zatížení pevnost dřeva klesá) [20].

Pevnost dřeva v tlaku

Pevnost dřeva v tlaku patří mezi mechanické vlastnosti dřeva. Pevností dřeva se rozumí odpor nebo též odolnost dřeva proti jeho porušení [9]. Namáhání tlakem patří mezi základní druhy mechanického namáhání, podle orientace síly vzhledem k vláknům rozlišujeme na pevnost v tlaku ve směru a napříč vláken. U konstrukčního dřeva je namáhání tlakem časté u svislých prvků (sloupů).

Tab. 15 Srovnání pevností v tlaku v N/mm² vybraných dřevin podle odborné literatury.

pevnost v tlaku s vlákny		smrk	buk	dub	habr	javor	lípa
z odborné literatury	[9]	34,1	56,7	59,8	62,5	59	–
	[33]	39,0	50,3	45	-	41	–
	[28]	33,6	58	57	73	58	48,3

V Tab. 15 je srovnána pevnost dřeva v tlaku rovnoběžně s vlákny uvedená v literatuře, * opět značí americké druhy blízké srovnávaným druhům: ^{*1}American beech (buk velkolistý, *Fagus grandifolia*), ^{*2}Oak red (dub červený, *Quercus rubra*), ^{*3}Maple Bigleaf (javor velkolistý, *Acer macrophyllum*).

Pevnost dřeva v ohybu

U konstrukčního dřeva patří namáhání na ohyb mezi nejčastěji se vyskytující druhy namáhání, zejména u horizontálních prvků, jako jsou stropní prvky, střešní nosníky, průvlaky apod. Pevnost dřeva v ohybu uvedená v literatuře je srovnána v Tab. 16, * opět značí americké druhy.

Tab. 16 Srovnání pevností v ohybu v N/mm² vybraných dřevin podle odborné literatury.

pevnost v ohybu		smrk	buk	dub	habr	javor	lípa
z odborné literatury	[9]	R 70,4 T 72,9	124	85,2	130,7	114	–
	[33]	72,0	103*	96*	-	74*	–
	[28]	57,1	117	97	145	129	98,9

Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřebné na vyvolání deformace. Rozlišujeme moduly pružnosti *E* při normálových namáháních (tah, tlak, ohyb) a moduly *G* při tangenciálních namáháních (kroucení, smyk) [9]. V Tab. 17 je provedeno srovnání hodnot modulu pružnosti v ohybu dostupných v odborné literatuře. * značí americké druhy.

Tab. 17 Srovnání modulů pružnosti v ohybu v N/mm² vybraných dřevin.

modul pružnosti v ohybu		smrk	buk	dub	habr	javor	lípa
z odborné literatury	[9]	8210	12 966	-	13 417	9 582	–
	[33]	8500	11900*	11300*	-	10000*	–
	[28]	-	16 495	13 400	16 700	11 650	7484

2.3 Listnaté dřevo jako vysoce funkční materiál

Poznatky a zkušenosti vyplývající z analýzy dlouhodobého působení historických konstrukcí jsou důležité pro navrhování nových konstrukcí a vývoj konstrukčních systémů [1]. Použití listnatého dřeva v konstrukcích pozemních staveb není nová myšlenka. V historii bylo listnaté dřevo na našem území běžně používáno, přestože se listnaté stromy vyznačují kratším, silnějším a méně rovným kmenem. Ani doba růstu listnatých dřevin 120 až 150 let (oproti 80 až 100 letům u jehličnatých dřevin) nebyl zřejmě v minulosti rozhodující faktor, neboť dřeva (listnatého) byl dostatek.

2.3.1 Historické použití listnatého dřeva pro stavební účely

Důvod použití listnatého dřeva coby stavebního materiálu v historii je zřejmě dvojitý. Prvním důvodem byla dostupnost listnatého dřeva, respektive smrkové či jiné jehličnaté dřevo nebylo v našich klimatických podmínkách běžně k dispozici, jak je tomu dnes. Lidé používali materiál, který byl lokálně dostupný. Tomuto odpovídá četné použití dřeva listnatých dřevin v lidové architektuře, která je v České republice příkladem středoevropské či východoevropské stavební kultury [34].

V lidovém stavitelství býval z listnatých dřevin zastoupen především dub; jehož dřevo se kromě jiného používalo k výrobě trhanic, což jsou mohutné štípané desky z dubových trámů, z nichž se nejpozději od 16. století roubily obytné i hospodářské stavby (hlavně stodoly) ve středním Polabí (zejména v okolí Městce Králové), na Jičínsku a jinde. Z trhanic se zhotovovaly také podlahy, stropy a na Hané vyplňují volné prostory u pilířových stodol [35]. Z ostatních listnatých dřevin se v minulosti více používalo k roubení bukové dřevo (pro svoji štěpnost vyžadovalo nárožní přesahy, sloužilo k obložení oken ap.), dále pak dřevo jilmové, topolové, jasanové na složení vodních mlýnů i jiných vodních zařízení [36].

Listnaté dřevo se v lidové architektuře nejvíce používalo:

- v roubených stavbách po celém území České republiky (např. objekty z oblasti karpatského typu roubeného domu [37], domy s roubenou jizbou nebo komorou ze dřeva z listnatých

stromů na Hané – zde bylo dřevo kombinováno s nespalným materiálem – hlinou a kamenem [38] (Obr. 27),

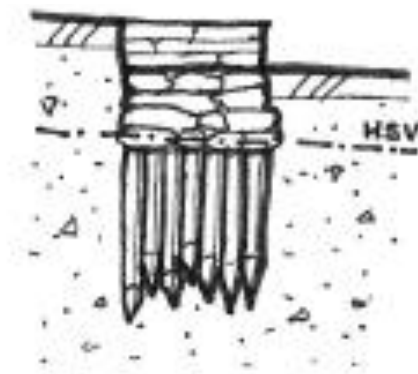
- v hrázděných stavbách v severozápadních Čechách,
- na stavbu stodol (používán dub a buk), vodorovné spáry byly vyplněny volně vloženými dřevěnými profily nebo zůstávaly zcela bez výplně [37], [39].
- Použití listnatého dřeva pro konstrukční dřevo je dokladováno i v ostatních zemích střední Evropy.



Obr. 27 Hanácký dům s výškou [38].

Druhý důvod k použití listnatého dřeva do konstrukcí byl ve znalosti jeho odlišných vlastností od dřeva jehličnatého, a tedy k jeho využití v takových oblastech, ve kterých by jehličnaté dřevo neobstálo. Jedná se zejména o použití tvrdého dřeva ve styku s vodou, ale i o jeho použití v mechanicky namáhaných částech staveb.

Ve styku s vodou se používalo zejména dubové a olšové dřevo, často na základy staveb ve složitých základových poměrech (podmáčená půda, písky) a pro zlepšování méně únosných zemin.



Obr. 28 Zakládání na pilotách z listnatého dřeva [40].

Listnaté dřevo nalezneme už v základech gotických staveb, kdy se používalo zakládání na dřevěném roštu uloženém na pilotách, zakládání na zděných studních a pásech. Jako izolace se používala cca 0,5 cm vrstva jílu. Na méně únosných zeminách se zakládalo na dubové či olšové piloty, zarážené hustě vedle sebe s mezerami vyplněnými kameny. Případně se na piloty prováděl dřevěný rošt pro založení zdiva. Piloty musely být prováděny tak, aby jejich horní zhlaví bylo trvale pod hladinou spodní vody [40].

Dubové, případně olšové piloty se objevují i později v základech lávek, mostů a domů. Jedním z mnoha příkladů použití listnatých dřevin pro zakládání staveb je Lednický Minaret, nejstarší dochovaná rozhledna na českém území postavená na přelomu 18. a 19. století. Stavba byla provedena v složitých základových podmínkách (močály, pohyblivé písky), a proto bylo v základové konstrukci použito listnaté dřevo. Ve výkopu o rozloze cca 480 m² bylo zaraženo cca 500 olšových na špici okovaných pilot o délce 17 m. Piloty byly spojeny dubovými rošty, na nichž je vybudována základová deska. Nedávné problémy se statikou objektu mají příčinu v kolísání hladiny podzemní vody, neboť olšové piloty vyžadují trvalé ponoření ve vodě [41].

Kromě zakládání bylo dřevo listnatých dřevin používáno např. pro vlhkostí namáhané prvky krovů (např. dubové pozednice skleníku v Květné zahradě v Kroměříži [42]), mechanicky namáhané průvlaky a překlady, případně další prvky ve stavbách, které byly namáhány dynamicky (pily, mlýny apod.).

2.3.2 Možnosti využití listnatých dřevin v současnosti

Novodobě lze využít listnaté dřevo na mnoha úrovních stavebního průmyslu jak pro nosné tak nenosné konstrukce. Jeho možné použití lze obecně rozdělit do několika skupin:

- výrobky na bázi dřeva použité na nenosné i nosné konstrukce (OSB desky, překližky, vrstvené dřevo LVL, jejich použití např. v I nosnících),
- výrobky z masivního dřeva použitého na
 - nenosné konstrukce (obklady fasád, podlahy),
 - nosné konstrukce (konstrukční řezivo, KVH hranoly, CLT desky, lepené lamelové dřevo),
- výrobky ze dřeva s upravenými vlastnostmi.

2.3.2.1 Výrobky na bázi dřeva

Listnaté dřevo lze využít ve výrobcích na bázi dřeva jako jsou např. OSB desky, překližky či vrstvené dřevo LVL (laminated veneer lumber). Výzkumem použití listnatého dřeva v OSB deskách samostatně či v kombinacích se zabývá mnoho zahraničních studií, např. [43], [44]

a další články stejného autora, dále [45], a další. Výzkum použití listnatého dřeva v LVL v různých kombinacích je popsán např. ve studiích [46], [47], [48] a dalších. Výsledky těchto studií ukazují, že použitím listnatého dřeva v OSB deskách, překližkách či vrstveném dřevě LVL lze dosáhnout lepších mechanických vlastností (pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu), než u běžně používaného dřeva jehličnatého (pro výrobu OSB desek se běžně používá dřevo borové).

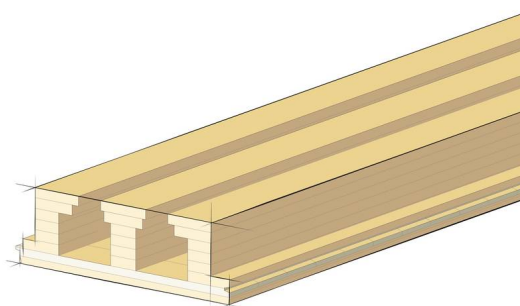
OSB desky, překližky a LVL lze použít samostatně nebo z nich lze sestavit nosné prvky:

- I nosníky se stojinou z OSB, LVL, překližky či tvrdé dřevovláknité desky, a pásnicemi z masivního nebo vrstveného dřeva pro ohybem silně namáhané stavební prvky jako jsou krokve a stropní nosníky (Obr. 29),



Obr. 29 Příklady dřevěných I nosníků [49].

- lepené bloky či prvky z vrstveného dřeva pro vnější i vnitřní stěny a stropy (viz Obr. 30),



Obr. 30 Příklad lepeného prvku pro stropní nebo střešní konstrukce, který by bylo možné vyrobit z vrstveného dřeva [50].

- kombinace či spřažení nosníků s deskami na bázi dřeva nebo s jiným materiálem, např. betonem, včetně kompozitních dřevo-betonových prvků (chováním těchto prvků se zabývá např. literatura [51], [52] a další.

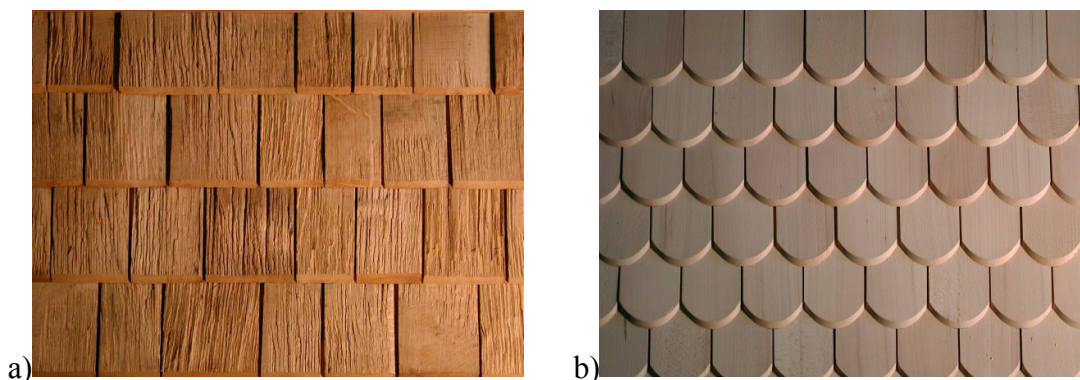
2.3.2.2 Výrobky z masivního dřeva

Výrobky pro nenosné konstrukce

V oblasti nenosných konstrukcí se již listnaté dřevo historicky používalo a jeho využití je zejména na výrobu masivních či vícevrstvých podlah, ať již deskových nebo klasických parket, terasových prken, schodišťových stupňů, dveřních prahů atd. Rezervou v použití listnatého dřeva v této oblasti je podle [53] možnost použití na průmyslové podlahy do vysoce mechanicky a chemicky namáhaných prostor (do výrobních hal, skladů, laboratoří, supermarketů, škol, sportovních hal a školek).

Obzvláště oblíbený, ceněný a využívaný je v této oblasti dub, jehož širokému použití v této oblasti odpovídá i široká nabídka dubového řeziva u výrobců. Méně oblíbený je buk, jež se používá pro výrobu schodišťových stupňů či madel k zábradlí a parket [19]. I když tedy výrobci v ČR nabízejí bukové řezivo, většinou je využito na výrobu spárovek a v nábytkářském průmyslu.

Další oblastí možného použití listnatého dřeva je na prvky fasád. Nejstarším příkladem dřevěné fasády jsou roubené stavby. Současné dřevěné fasády mohou být z masivního dřeva ve formě šindelů, panelů nebo profilů, jakož i z dřevo-kompozitních materiálů. Na výrobu šindelů nejen na obklady fasád, ale i jako střešní krytinu, je díky vysokému obsahu tříslovin vhodné dubové dřevo, habrové dřevo vyžaduje odpovídající ochranu, přesto však jsou např. v Německu výrobci, kteří trvanlivost šindelů zaručují (viz Obr. 31) [53].

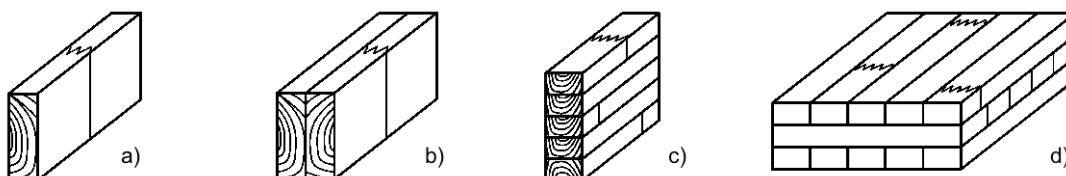


Obr. 31 Dřevěné šindele z nabídky německé firmy Theo Ott Holzschindeln: a) dubový štípaný šindel, b) habrový šindel [54].

Výrobky pro nosné konstrukce

V této oblasti lze listnatého dřeva využít jako:

- **Rostlé dřevo:** pro dřevěné konstrukce se používají prvky jako např. deskové řezivo (prkna, fošny), hraněné řezivo (latě, hranoly), polohraněné řezivo a kulatina. Nevýhodou těchto prvků je jejich objemová nestálost při působení vlhkosti. Stejně tak tyto prvky hůře odolávají účinkům požáru. Tyto prvky je ale možné dále upravovat a jejich kombinací a lepením v jeden kompaktní celek vytvořit lepené dřevěné prvky. Rostlé dřevo lze také využít jako prvek pro vytvoření příhradových prvků.
- **KVH:** čtyřstranně hoblované prvky se sraženými hranami. Délkovým nastavováním jednotlivých profilů pomocí zubovitého spoje lze dosahovat běžně délek 13 m, v návaznosti na použitelnou technologii však lze dosahovat i délek větších.
- **DUO/TRIO hranoly:** skládají se ze dvou nebo tří samostatných bezjaderných lamel, které jsou slepeny dohromady. V důsledku pevného spojení je produkt i v průběhu času rozměrově stabilní. Nosníky lze vyrobit až do délky 16 metrů.
- **CLT panely** („Cross laminated timber“ = křížem lepené dřevo): vyrobeno z kolmo na sebe lepených vrstev masivního dřeva. Díky tomu se snižují objemové změny dřeva na zanedbatelnou hodnotu. Stavby z CLT panelů jsou ekologické, přesné, rozměrově stálé, vzduchotěsné, difuzně otevřené, mají výbornou statickou únosnost.
- **Lepené lamelové dřevo** (v odborné literatuře často označované jako BSH, LLD, glulam): vyrábí se z lamel z masivního dřeva vysušeného na předepsanou hodnotu, takže výsledný materiál je tvarově stálý a odolný jak proti zakřivení, tak tvorbě výsušných trhlin. Lamely k sobě přiléhají zubovitým spojem, lepí se bočně, výsledek se posuzuje jako celistvý profil. Tato technologie umožňuje velkou variabilitu tvarů i konstrukčních vlastností.



Obr. 32 Přehled lepených prvků podle [55]: a) konstrukční dřevo spojované zubovitým spojem (ve výrobě označované jako KVH), b) lepené rostlé dřevo (ve výrobě označované jako DUO/TRIO hranoly), c) lepené lamelové dřevo (ve výrobě označované nejčastěji jako BSH), d) křížově lamelované dřevo (ve výrobě označované jako CLT).



Obr. 33 Lepený lamelový nosník z bukového dřeva, fotografie z výroby [56].

2.3.2.3 Dřevo s upravenými vlastnostmi

Kromě výrobků na bázi dřeva a výrobků z masivního dřeva lze listnaté dřevo využít také ve výrobcích ze dřeva s upravenými vlastnostmi. Vlastnosti dřeva je možné za účelem jejich ovlivnit úpravami, jako je paření a vaření dřeva, mikrovlnná modifikace, plazmatická modifikace, lisování, tepelná, biologická či chemická modifikace dřeva. Pro listnaté dřeviny by mohly být zajímavé následující úpravy:

- Patinování, předzvětrávání: Při této úpravě je dřevo v rámci procesu zpracování vystaveno UV záření, vlhkosti a někdy určitým dřevokazným houbám, čímž je docíleno vzhledu neošetřené fasády vystavené silnému dešti po dobu několika let. Tato úprava minimalizuje pozdější barevné rozdíly [53].
- Thermowood: Dřevo je tepelně upraveno, díky čemuž vykazuje vyšší tvrdost a rozměrovou stálost. Vyrábí se zahříváním, následnou impregnací parou a prudkým ochlazením dřeva.
- Opalované dřevo: Dřevo se opaluje na několik stupňů od jemného opálení až po spálení dřeva. Tato úprava chrání dřevo před škůdci, plísní, houbami i vodě.

Dřevo s upravenými vlastnostmi není předmětem řešení dizertační práce a tato oblast je uvedena pouze pro úplnost.

2.3.3 Lepené lamelové dřevo

Z výše uvedených možností využití listnatého dřeva se disertační práce zaměřuje na výrobky z masivního dřeva pro nosné konstrukce, konkrétně na lepené lamelové dřevo.

Lepené lamelové dřevo se v České republice vyrábí již od roku 1952. V roce 2005 dosahovala podle [20] tuzemská výroba maximálních rozměrů prvků šířky 0,24 m, výšky 2,0 m a délky 32,0 m.

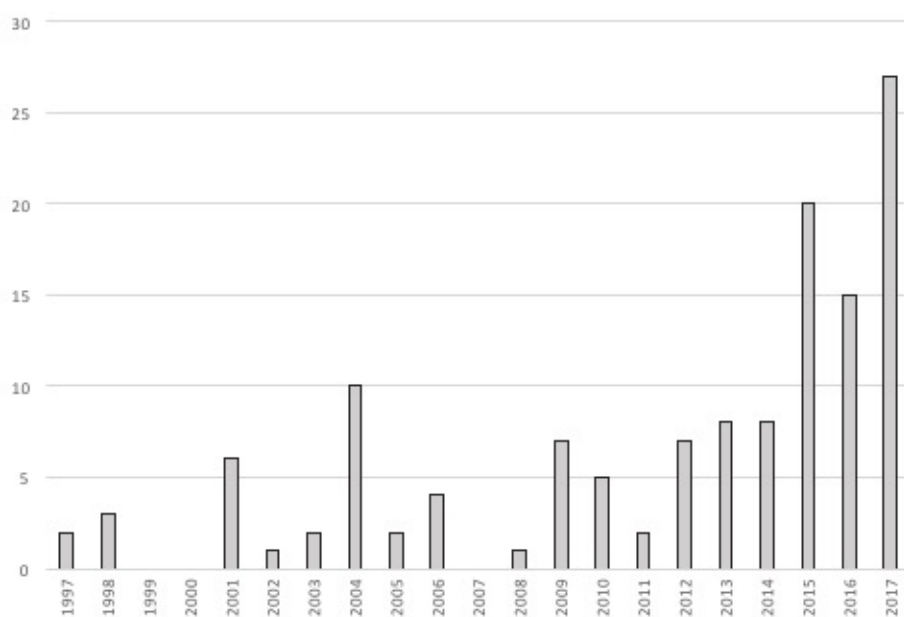
Výhody lepeného lamelového dřeva spočívají zejména v eliminaci negativních vlastností rostlého dřeva, jako jsou:

- deformace průřezu,
- vznik výsušných trhlin,
- omezená délka prvku,
- omezené dimenze profilů.

Mezi jeho další výhody patří rovněž:

- zvýšení statické spolehlivosti,
- lepší poměr mezi hmotností a únosností oproti masivnímu prvku,
- tvarová a konstrukční variabilita,
- vyšší požární odolnost,
- rychlá montáž,
- ekologické vlastnosti.

Zvyšující se zájem odborné veřejnosti o téma lepených lamelových prvků z listnatého dřeva je zřejmý z nárůstu počtu vědeckých článků, jenž lze sledovat na zvyšujícím se počtu výsledků nalezených při zadání hesla *hardwood glulam* v databázi Science Direct (Obr. 34).

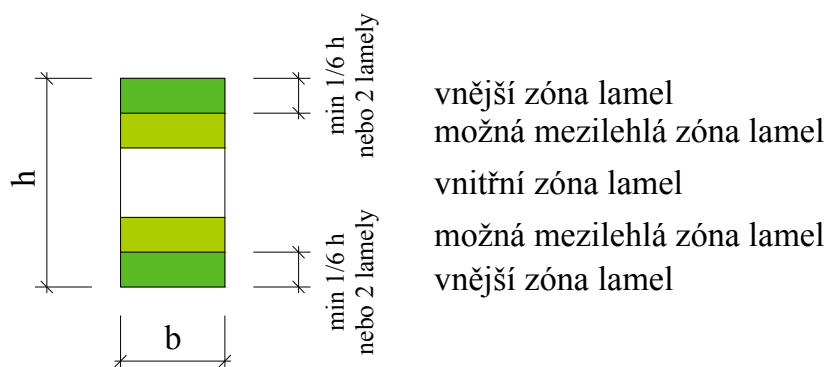


Obr. 34 Výskyt hesla *hardwood glulam* v databázi Science Direct.

2.3.3.1 Možnosti skladby nosníku

Podle skladby lze lepené lamelové dřevo rozlišovat na:

- **homogenní lepené lamelové dřevo**, charakterizované normou ČSN EN 14080 [55], kde je příčný řez nosníku tvořen lamelami ze dřeva jednoho druhu dřeviny a stejných mechanických vlastností;
- **kombinované lepené lamelové dřevo**, rovněž charakterizované normou [55], kde je příčný řez nosníku tvořen lamelami ze dřeva stejné dřeviny ale různých mechanických vlastností, vznikají tak jednotlivé zóny lamel (Obr. 35);
- **hybridní lepené lamelové dřevo**, definované v dokumentu Zulassungsgegenstand: BS-Holz aus Buche [57] (viz kap. 2.3.6), ale v normě [55] neznámé, kde je pro lamely jednotlivých zón možno použít různé druhy dřeva. Konkrétně je v [57] uvažováno pro vnější zónu lamel dřevo bukové a pro vnitřní zónu lamel měkké (pravděpodobně jehličnaté) dřevo, přičemž vnější lamely musí být na obou stranách stejné pevnostní třídy a musí zahrnovat na každé straně minimálně $1/6$ výšky nosníku nebo 2 lamely.

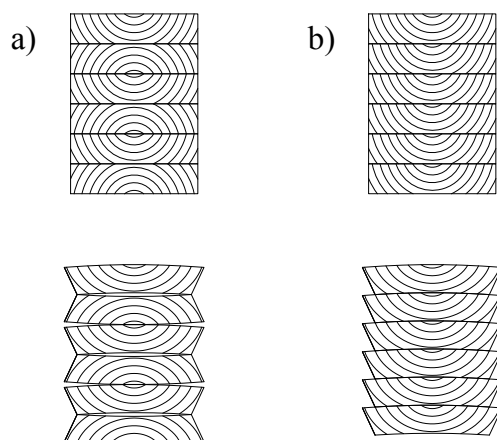


Obr. 35 Příklad skladby nosníku z kombinovaného lepeného lamelového dřeva [55].

O výběru dřevin pro výrobu lepených nosníků a jejich případných kombinacích se rovněž zmiňuje literatura [58], která nedoporučuje použít v jednom konstrukčním prvku kombinaci jehličnatého a listnatého řeziva s ohledem na značné rozdíly v sesychání. Připouští však kombinaci různých druhů jehličnatého řeziva při splnění podmínky vysušení na stejnou vlhkost. Zmiňuje rovněž možnost výroby lepených konstrukcí z tvrdého dřeva (buku, dubu).

Vzhledem k rozdílnému pracování dřeva v radiálním a tangenciálním směru při změně vlhkosti dřeva se podle [58] vyžaduje v jednom lepeném lamelovém prvku použít lamely s přibližně stejným průběhem letokruhů (Obr. 36). Pokud se má předejít tomu, aby v lepených spojích lamel nedocházelo ke vzniku velkého vnitřního napětí v tahu kolmo k lepené spáře, má

být uspořádání letokruhů ve všech deskách stejné. Nepříznivý vliv tahových napětí se omezi též zmenšením šířky jedné lamely v jedné vrstvě lamelového prvku.

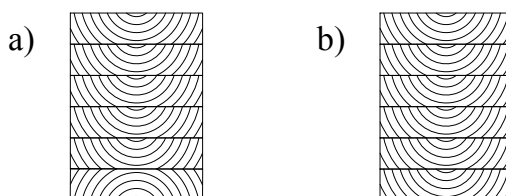


Obr. 36 Uspořádání desek podle průběhu letokruhů v lepeném prvku: a) nesprávné uspořádání, b) správné uspořádání [58].

Podle ČSN EN 14080 [55] musí mít lamely dřev na téže straně a u obou vnějších lamel musí být strany s dřevní (Obr. 12 v kap. 2.2.1.2) obráceny ven (tj. vnější strana je pravá), viz obrázek Obr. 37 a), s výjimkou lepeného lamelového dřeva určeného do tříd provozu 1 nebo 2, kde smí být u obou vnějších lamel strana s dřevní v témže směru, viz Obr. 37 b). Pro omezení příčného zakřivení a vzniku trhlin se lamely pro výrobu lepeného lamelového dřeva mohou opatřit podélnými odlehčovacími zářezy.

Třídy provozu jsou v [59] charakterizovány takto:

- Třída provozu 1 (SC1): vlhkost odpovídající teplotě 20 °C a relativní vlhkosti okolního vzduchu přesahující 65 % pouze po několik týdnů v roce.
- Třída provozu 2 (SC2): vlhkost materiálů odpovídající teplotě 20 °C a relativní vlhkosti okolního vzduchu přesahující 85 % pouze po několik týdnů v roce.
- Třída provozu 3 (SC3): je charakterizována klimatickými podmínkami vedoucími k vyšší vlhkosti než ve třídě provozu 2.



Obr. 37 Orientace lamel v průřezu [55].

Dovolené konečné rozměry lamel

Dovolená tloušťka h (v mm) opracovaných lamel je podle ČSN EN 14080 [55] pro lepené lamelové dřevo doporučeno (v normě dle Tab. I.2):

- pro třídu provozu SC 1 nebo 2 podle [59] $6 \leq h \leq 45$,
- pro třídu provozu SC 3 podle [59] $6 \leq h \leq 35$.

Pro zakřivené lepené lamelové dřevo je pro dovolenou konečnou tloušťku t opracovaných lamel také rozhodující poloměr křivosti r lamely s nejmenším poloměrem křivosti lepeného lamelového prvku a deklarovaná charakteristická pevnost v ohybu podélných spojů lamel.

Pro bukové lamely uvádí [57] požadavek na maximální průřez lamel $b \times h = 150 \times 30$ mm, který nesmí být překročen.

2.3.3.2 Lepení

Lepení tvrdého dřeva je podle [53] problematické, zejména výroba LLD vyžaduje vysoce kvalitní lepené spoje lamel i zubovitých spojů. Obecně jsou pro lepení tvrdého dřeva dostupná stejná lepidla jako pro měkké dřevo. Průzkum výrobců LLD ve Švýcarsku, Německu a Rakousku podle [53] ukázal, že 51 % používá lepidla obsahující melamin (MUF/MF), 35 % polyuretanová lepidla (PUR) a 9 % lepidla obsahující resorcinol (RF/PRF).

Použití lepidla musí podle ČSN EN 14080 [55] zajišťovat stejnoměrné nanášení v požadovaném množství a spolehlivé smíchání složek lepidla. V době nanášení lepidla musí být lepené povrchy čisté. Lepidlo se musí používat v souladu s pokyny výrobce lepidla. Při sestavení musí být obsah vlhkosti všech neošetřených prken mezi 6 % a 15 %, kromě toho se musí dodržovat pokyny výrobce lepidla [55].

Podle [57] musí být obsah vlhkosti bukových lamel při lepení v rozmezí 9 % až 12 %, pro ostatní typy dřeva nejsou platná žádná legislativní ustanovení, která by vlhkost lamel ani jiné požadavky ustanovovala.

Lisovací tlak se musí zvolit v závislosti na průřezu lamel, druhu dřeva, druhu lepidla a způsobu zpracování. Musí se uvážit hodnoty tlaku uvedené v datovém listu výrobce lepidla. Normou [55] doporučené hodnoty lisovacího tlaku jsou uvedeny v Tab. 18. Pro zakřivené lepené lamelové výrobky je možné tyto hodnoty zvětšit. V průběhu lisování musí být lisovací tlak udržován.

Tab. 18 Doporučené hodnoty lisovacího tlaku podle [55].

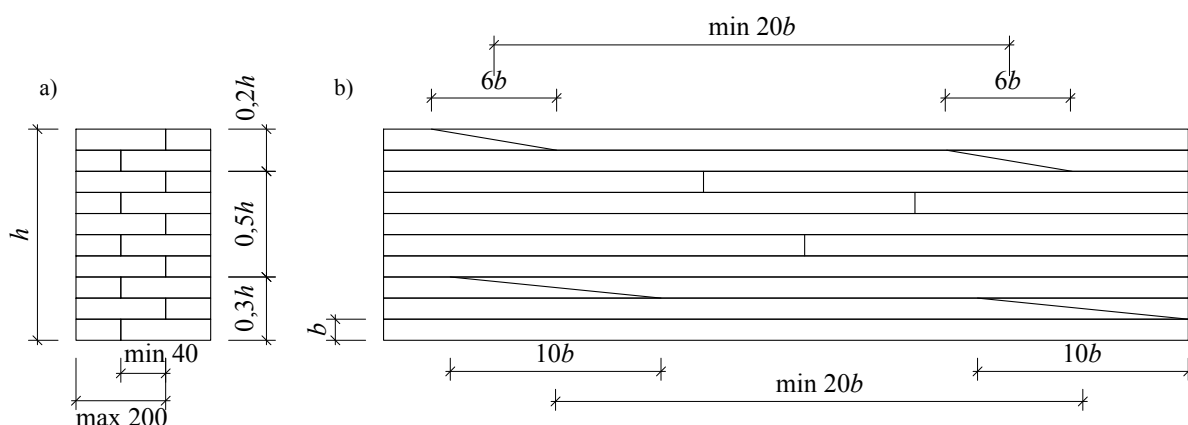
tloušťka lamely h v mm	$h \leq 35$	$35 \leq h \leq 45$	$45 \leq h \leq 85$
lisovací tlak v N/mm ²	0,6 až 0,8	0,8 až 1,0 pro lamely s odlehčovacími zářezy 1,0 pro lamely bez odlehčovacích zářezů	0,8 až 1,0

Teplota dřeva v lepené spáře během vytvrzování za tlaku a během požadované dodatečné doby vytvrzování nesmí být menší než 18 °C. Lepené lamelové dřevo se musí manipulovat tak, aby proces dodatečného vytvrzování nebyl ovlivněn deformací nebo kmitáním.

2.3.3.3 Možnosti provedení délkového spoje

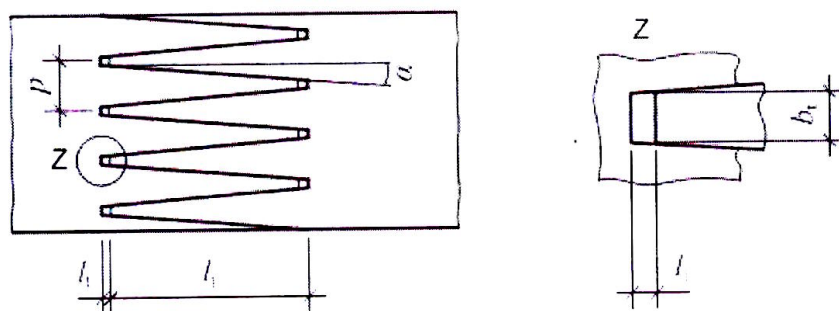
Pro únosnost celého prvku LLD jsou klíčové styky jednotlivých lamel, a to jak podélné napojování lamel, tak spojování jednotlivých lamel v rámci tloušťky průřezu.

Jednotlivé lamely se délkově napojují pomocí zubovitého spoje (Obr. 39). Dříve byl podle [58] pro spoje lamel používán spoj úkosový se sklonem 1:10. Kvůli velké délce tohoto spoje byl vyvinut spoj zubovitý, který se vyznačuje malým odpadem materiálu. V tlačené oblasti rovné $0,2 h$, kde h je výška prvku je možno podle [58] použít úkosový spoj o příznivějším poměru 1:6, ve střední části průřezu s výškou $0,5 h$ lze nastavovat desky tupým srazem (Obr. 38).



Obr. 38 Skladba a stykování desek v lepeném prvku: a) v průřezu, b) po délce prvku [58]; h je výška lepeného prvku, b je šířka lamely.

Zubovitý spoj (Obr. 39, finger joint, keilzinkenverbindung) je podle ČSN EN 14080 [55] definován jako samostředící podélný spoj vytvořený frézou na drážky opracováním více stejných, konických souměrných ozubů v čelech dřevěných prvků, které se potom slepí.

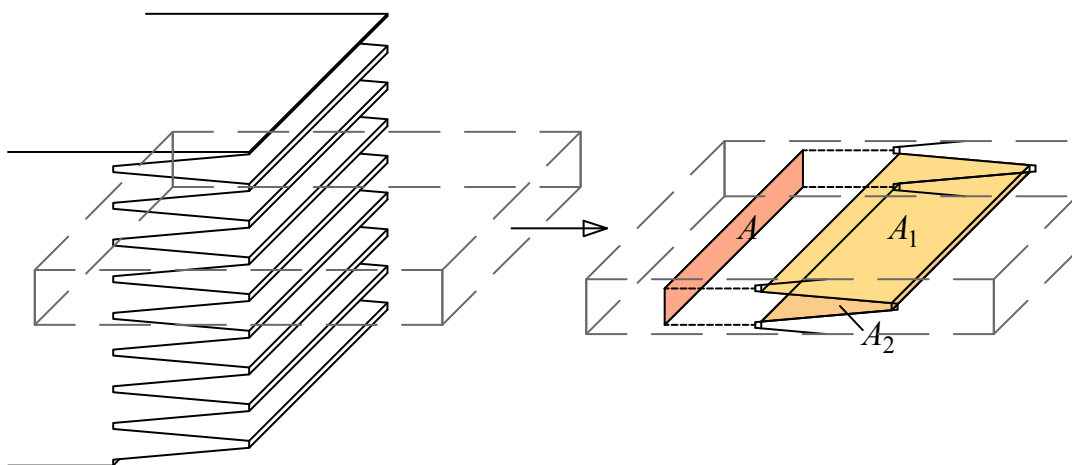


Obr. 39 Typický profil zubovitého spoje [55]; l_j je délka ozubu, p rozteč ozubů, α je sklon ozubu, l vůle v zubovitém spoji, b_r šířka tupého zakončení ozubu.

Zubovitý spoj se vyfrézuje v čele prkna či fošny, nanese se lepidlo a spoj se potom slisuje po dobu nejméně 2 s. Požadavky na výrobu zubovitého spoje udává norma [60] v Příloze G. Tato norma se však omezuje na dřevo zejména jehličnatých dřevin, shodně jako norma [55]. V současné době používané typy spojů jsou tedy navrženy a ověřeny zejména pro jehličnaté dřevo. U zubovitého spoje jde v podstatě o to, aby základní plocha průřezu byla nahrazena lepenou plochou zubů, přičemž účinnost zubovitého spoje, tedy poměr mezi lepenou plochou zubů a základní plochou průřezu by měla být podle [20] větší nebo rovna 6:

$$\frac{A_g}{A} \geq 6, \quad (1)$$

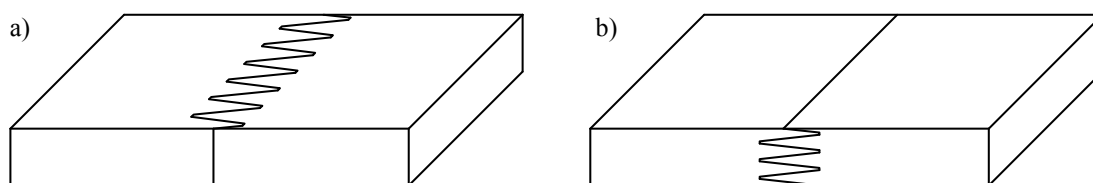
kde A_g je plocha zubů, pro kterou platí $A_g = A_1 + A_2$, A je odpovídající plocha průřezu (Obr. 40).



Obr. 40 Účinnost zubovitého spoje, A_1 a A_2 značí plochu zubů a A odpovídající plochu průřezu.

Při spojování lamel mohou být použity jak spoje stojaté (zuby jsou viditelné shora/zespod lamely; Obr. 41 a), tak ležaté (zuby jsou viditelné zboku lamely; Obr. 41 b). Spoj však musí

splňovat požadavky na účinnost zubovitého spoje a pevnost zubovitého spoje musí odpovídat normám ČSN EN 14080 [55] a ČSN EN 15497 [60]. Prakticky však naprostá většina výrobců LLD, a tedy i zubovitých spojů v ČR používá spoje stojaté, a to zejména z důvodu jednodušší výroby. Literatura [61] uvádí, že stojaté zubovité spoje vykazují vyšší únosnost než spoje ležaté.



Obr. 41 Zubovitý spoj a) stojatý, b) ležatý.

Co se týče délky ozubu, je v ČR pro spojování lamel LLD používána de facto pouze jediná, a to 15 mm. Tato délka spoje je vyhovující pro smrkové řezivo, ovšem pro bukové je nedostatečná, jak uvádí např. [62]. V Německu je nejčastější používaná délka 20 mm [63], ale používá se i 30 mm.

Provedení zubovitých spojů lamel je hojně řešeno v zahraniční literatuře. Například Bourreau v literatuře [64] zkoumá provedení zubovitých spojů z různých druhů tvrdého dřeva, kde se ukazuje závislost pevnosti těchto spojů na několika faktorech souvisejících s lepením, jako je nanášení lepidla, doba lisování a použitý lisovací tlak. Dalšími faktory jsou objemová hmotnost použitého dřeva, průběh letokruhů a tloušťka lamely. Jiné práce (např. [65]) se zaměřují obecně na lepené spáry, vliv složení lepidel, míru penetrace lepidel do struktury dřeva a vlhkosti dřeva na formování lepených spár a jejich stabilitu či vliv drsnosti povrchu pro lepení. Několik numerických a teoretických studií ([62], [66] a další.) se zabývá mechanickými vlastnostmi zubovitého spoje v souvislosti s modelováním mechanického chování zubovitých spojů. Ve většině případů je chování lepených spojů popisováno pomocí metody konečných prvků.

Aicher v literatuře [63] popisuje testování pevnosti zubovitých spojů bukových lamel v tahu. Testuje spoje o délce zubu 20 mm, používá lepidlo melaminového typu. Tyto bukové vzorky o průřezu 115×42 mm dle [63] dosahují tahové pevnosti kolem 70 N/mm^2 .

Předpokladem vývoje adhesivních systémů pro tvrdé dřevo jsou vhodné zkušební metody, které je třeba ještě vyvinout. Schopnost lepení bukových prvků byla testována již v 60. letech 20. století a existoval názor, že výrobky lze vyrobit pomocí v té době používaných lepidel [53].

Při výrobě je ovšem potřeba se vyrovnat s obtížným spojením zubovitého spoje, vysokým opotřebením nástrojů a úsilí při zpracování [53].

Lepení zubovitého spoje

Při sestavení zubovitého spoje lamel musí být podle ČSN EN 14080 [55] obsah vlhkosti všech neošetřených prken mezi 6 % a 15 %. Rozdíl vlhkosti dvou prken určených k stykování nesmí být větší než 5 %. V čase lepení musí být lepené povrchy čisté. Lepidlo se musí nanášet na oba konce dřeva, pokud není v normě stanoveno jinak. Způsob nanášení musí zajistit, aby všechny povrchy ozubů v sestavovaném spoji byly pokryty lepidlem [55]. Kromě toho se musí dodržovat pokyny výrobce lepidla na požadovanou vlhkost a nanášení lepidla.

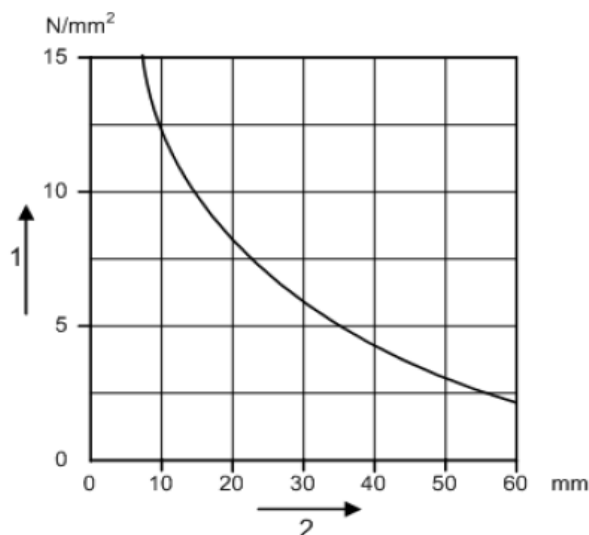
Při ručním nanášení lepidla se podle [55] smí lepidlo nanášet pouze na konec jednoho dřevěného prvku. Nanesení na všechny plochy ozubů se musí vizuálně zkontrolovat. Tento obecný požadavek se považuje za splněný, když při aplikaci čelního tlaku lepidlo vystupuje na všech čtyřech površích spoje.

Podle požadavků normy [55] musí být zubovité spoje v lamelách slepeny do 6 hodin po frézování zubovitého profilu.

Lisování zubovitého spoje

Zubovitý spoj musí být vyroben jako samosvorný, samosvornost spoje se zajišťuje dostatečnou vůlí v zubovitém spoji l_t (Obr. 39). Počáteční lisování zajistí dokonalé přitlačení lepených ploch. Norma ČSN EN 15497 [60] uvádí požadavek na relativní vůli spoje po zalisování e , která je dána poměrem mezi l_t a l_j , kde l_t je vůle v zubovitém spoji, l_j je délka ozubu, relativní vůle má být po zalisování 0,01 až 0,08 (tedy pro délku zubů $l_j = 25$ mm by měla být vůle v zubovitém spoji $l_t = 0,25$ až 2 mm).

Lisovací tlak podle [60] závisí na geometrii zubovitého spoje, druhu dřeva, obsahu vlhkosti, teplotě dřeva a na průřezu dřeva. Doporučený lisovací tlak podle [60] je uveden na Obr. 42. Pokud je lisovací tlak vyvozen v cyklickém lisu na zubovité spoje, lisovací tlak musí působit na zubovitý spoj pro dřevo s tloušťkou menší než 45 mm nejméně 1 s (pro lepené rostlé dřevo platí požadavek na minimálně 2 s).



Obr. 42 Doporučený lisovací tlak; 1 je lisovací tlak, 2 je délka ozubů [60].

Vytvrzování

Teplota dřeva v lepené spáře během vytvrzování zubovitého spoje nesmí být podle ČSN EN 14080 [55] menší než 18 °C. Plně nevytvrzené spojené lamely musí být přemísťovány takovým způsobem, aby proces vytvrzování nebyl ovlivněn deformací nebo vibracemi. Spojené lamely smí být dále opracovány, pokud se zajistí, že proces vytvrzování není ovlivněn.

2.3.4 Výzkum v oblasti využití listnatého dřeva u nás a v zahraničí

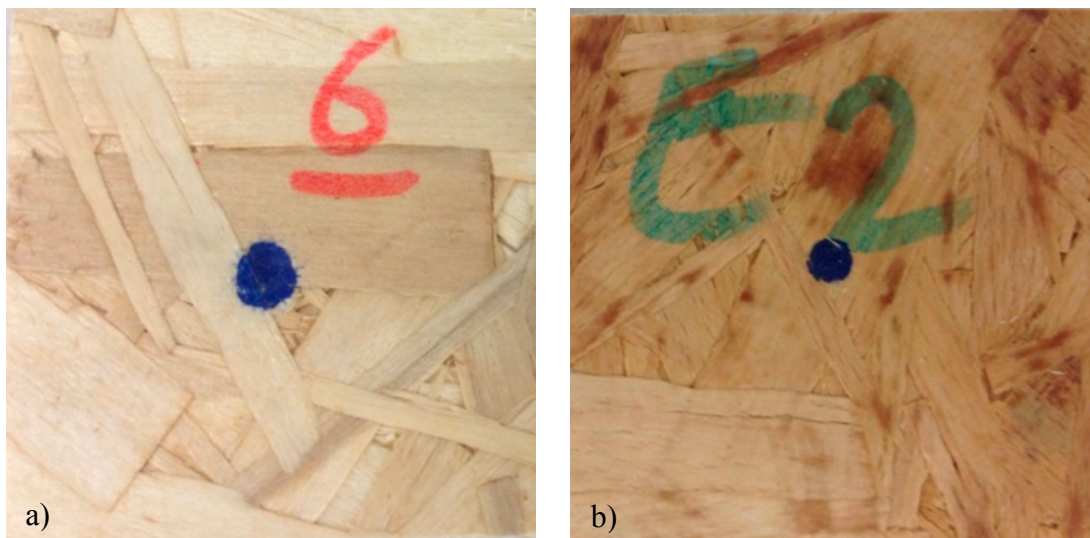
V České republice se problematikou využití listnatého dřeva zabývají některé výzkumné, vývojové a výrobní instituce. Například vědečtí pracovníci z Lesnické a zemědělské fakulty Mendelovy zemědělské univerzity v Brně. Jejich výzkum je soustředěn zejména na lepší zužitkování bukového dřeva, zejména pro výrobu nábytku, ale i pro stavební účely. Snahou je přesvědčit odbornou a uživatelskou veřejnost, že dřevo je nejen ekologičtější, ale v řadě případů i efektivnější materiál než jiné, standardně používané materiály. Důležitou součástí výzkumu je vyhodnocení možností a metod zlepšování vlastností dřeva. Používají se speciální nátěry nebo metody jako je prudké zapečení a následné ochlazení dřeva, opálení dřeva a jiné [6].

V zahraničí je problematika využití listnatého dřeva více probádána. Vědecké práce orientované na listnaté dřevo lze obecně rozdělit do několika skupin:

- Práce zabývající se **tříděním listnatého řeziva a jeho optimalizací**, případně hodnocením kvality listnatého řeziva, např. [67], [68].
- Práce zabývající se **fyzikálně-mechanickými vlastnostmi listnatého dřeva** nebo výrobků z něj se soustředí většinou na tyto dřeviny: javor (*Acer*), bříza (*Betula*), buk lesní (*Fagus*

sylvatica), dub (*Quercus*), jasan (*Fraxinus*), lípa (*Tilia*) a orientální buk (*Fagus orientalis*) [69], [70]. Většina z nich pochází z Německa a Švýcarska, ale i z dalších zemí Evropy (Rakousko, Rumunsko, Chorvatsko, Řecko, Norsko, Finsko, Švédsko aj.).

- Práce zabývající se začleněním listnatého dřeva do **výrobků na bázi dřeva**, ať již z jednoho druhu dřeviny, či v kombinaci více dřevin listnatých či dřevin listnatých s dřevinami jehličnatými (OSB desky, překližky aj.; [43], [44], [45], [71] a další), případně lepených desek (LVL, CLT; [46], [47], [48] a další).



Obr. 43 OSB desky z listnatého dřeva: a) topolového, b) bukového [71].

- Práce zabývající se **provedením lepených spár** listnatého dřeva obecně a dále zabývající se vlivem složení lepidel, míry penetrace lepidel do struktury dřeva a vlhkosti dřeva na formování lepených spár a jejich stabilitu, vliv drsnosti povrchu pro lepení [72], [73], [74].
- Práce zaměřené na **zubovité spoje** různých druhů listnatého dřeva, zabývající se vlivem nanášení lepidla, doby lisování a použitého lisovacího tlaku, jako např. [61], [62], [63], [64], [65], [75].
- Práce zabývající se **ověřením vlastností nebo proveditelností lepených dřevěných prvků** z listnatých dřevin, a to LLD [66], [76], [77], [78], , [79] či CLT [80], [81].

2.3.5 Zkušenosti s použitím listnatých dřevin v konstrukcích pozemních staveb

Zkušenosti s výrobou lepeného lamelového dřeva s použitím tvrdého dřeva jsou například ve Švýcarsku, kde se využívají zejména dřevina jako jasan a buk, ale i dub a akát.

Z příkladů použití listnatého dřeva v nosných konstrukcích staveb lze jmenovat:

- sportovní a víceúčelovou halu ve švýcarské obci Sargans postavenou v roce 2011 (objekt je podrobně popsán v kap. 2.3.5.1),
- parkovací objekt *Innerarosa* ve švýcarské obci Arosa z roku 2010 (objekt je podrobně popsán v kap. 2.3.5.2),
- výrobní halu švýcarské společnosti Siga v lokalitě Schachen (Švýcarsko) z roku 2018 (objekt je podrobně popsán v kap. 2.3.5.3),
- projekt *Woodstock* (Obr. 44) poprvé představený na Swissbau v Basileji v roce 2010, jedná se o prototyp vícepodlažního objektu, jehož nosnou konstrukci tvoří stěnové a stropní prvky z buku, přičemž na celou konstrukci bylo použito 45 m³ bukového dřeva [53],



Obr. 44 Projekt Woodstock, Basilej, Švýcarsko [53], [82].

- čistě dřevěný most *Neumattbrücke* (Obr. 45) ve švýcarské obci Burgdorf-Kirchberg z roku 2013, kde bylo pro konstrukčně nejvíce namáhané části použito jasanové lepené lamelové dřevo a pro povrch vozovky dřevo dubové [83],



Obr. 45 Čistě dřevěný most Neumattbrücke [83].

- zastřešení *Tribune Kulm Hotel* (Obr. 46) v obci St. Moritz z roku 2016/2017 od architekta Normana Fostera o délce 21,4 m a s vyložení 4,20 m, jenž je vynášeno 12 konzolami z jasanového lepeného lamelového dřeva, hrana střechy je obložena modřínovým dřevem [84],



Obr. 46 Objekt Tribune Kulm Hotel, St. Moritz, Švýcarsko [56].

- experimentální budova *House of Natural Resources* (Obr. 47) otevřená v roce 2015 v Curychu, v horních dvou patrech budovy byl podle [85] použit experimentální nosný systém z tvrdého dřeva – podpory jsou z jasanového lepeného lamelového dřeva, strop kompozitní z bukového dřeva a betonu.



Obr. 47 *House of Natural Resources*, Curych, Švýcarsko, a) podpory z jasanových lepených prvků, b) bukovo-betonový kompozitní strop [85].

Další projekty, na které bylo použito listnaté dřevo pro nosnou konstrukci pozemních staveb lze nalézt například na anglické verzi webových stránek společnosti Neue Holzbau AG v sekci References – Hardwood Projects [86]. Vybrané projekty jsou představeny v následujících kapitolách.

2.3.5.1 Sportovní a víceúčelová hala, Sargans



Obr. 48 Sportovní a víceúčelová hala, Sargans, 2011, pohled [87].

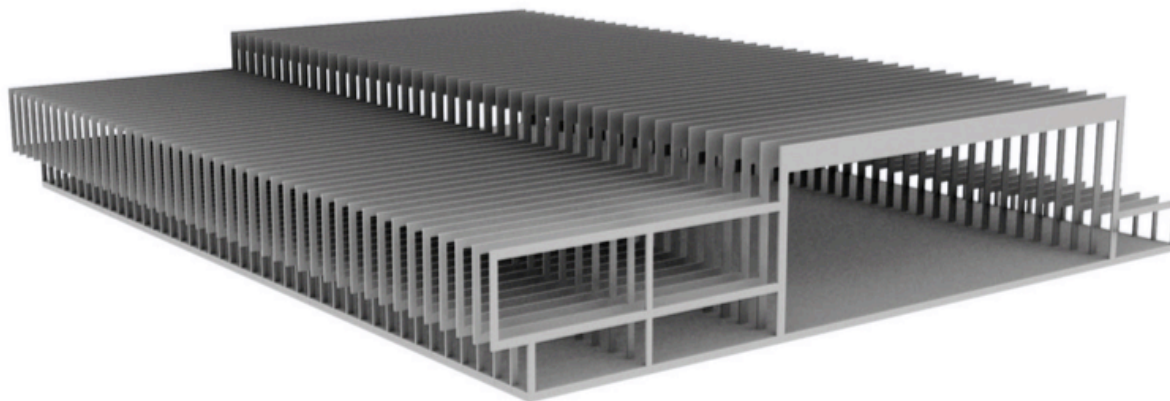
Objekt sportovní haly je podle [87] 60 m dlouhý, 30 m široký a 10 m vysoký, část objektu je dvoupodlažní. Kromě samotné sportovní haly jsou v objektu úložné prostory pro vybavení, šatny a tělocvičny pro gymnastiku a fitness.



Obr. 49 Interiér sportovní haly v Sargansu [87].

Nosnou konstrukci haly tvoří 40 štíhlých částečně dvoupodlažních rámců z lepeného lamelového dřeva různé pevnosti (do GL 36h) s rozpětím 28,8 m. Sloupy mají profil 140×800 mm a v rozích jsou se stropními nosníky profilu 140×1440 mm spojeny ocelovými pásy, šrouby

a závitovými tyčemi. Z hlediska nutnosti vynášení velkého namáhání způsobeného stálým zatížením a sněhem byly ohybově téměř tuhé rohy rámu předem zatíženy pozitivními momenty, stropní trámy byly navrženy do mírného oblouku a tam, kde to bylo nutné ze statických důvodů, bylo převážně použité smrkové dřevo doplněno únosnějším dřevem jasanovým [87].



Obr. 50 Nosná konstrukce sportovní haly [87].

V objektu je podle [87] část stropu řešena jako kompozitní strop ze dřeva (hybridními jasanovo-smrkovými lepenými prvky) a 70 mm tlusté betonové desky (Obr. 51). Stropní trámy ve stropě dvoupodlažní části jsou kvůli značnému zatížení od prefabrikovaných betonových stěn, stropů a sprchových kabin navrženy jako lepené lamelové nosníky z jasanového dřeva (GL40).



Obr. 51 Použití hybridních jasanovo-smrkových lepených lamelových prvků v kompozitním dřevo-betonovém stropě dvoupodlažní části sportovní haly [87].

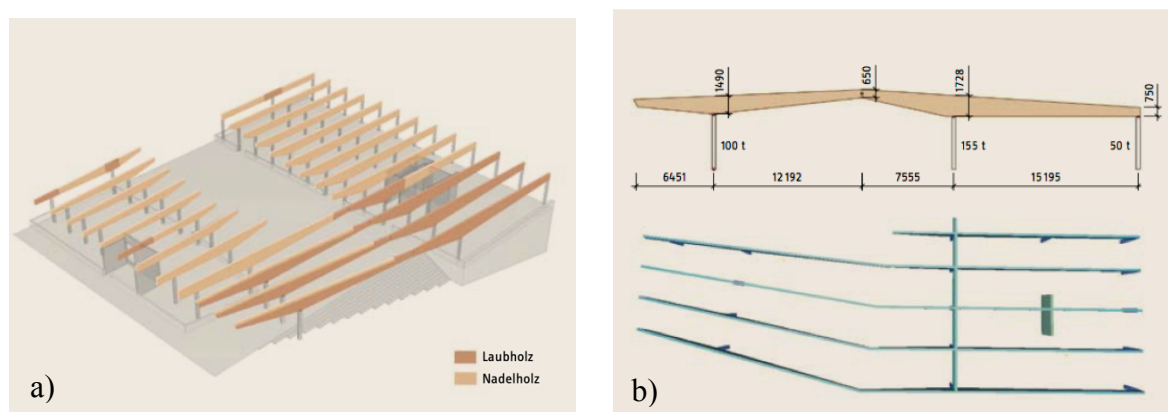
Ztužení budovy je provedeno pomocí OSB desek, vnější obklad je tvořen neošetřeným obkladem z místního smrku [87].

2.3.5.2 Parkovací objekt Innerarosa

Jedná se o objekt sloužící k parkování v lyžařském středisku v nadmořské výšce přes 1800 m. Z architektonického hlediska tvoří budova vstupní portál do lyžařského střediska. V budově nad dvoupodlažním podzemním parkovištěm se nacházejí prostory lyžařské a snowboardové školy, servisní místnosti a dětská lyžařská škola [88].



Obr. 52 Parkovací objekt tvoří vstupní portál do lyžařského střediska [88].



Obr. 53 Konstrukce parkovacího objektu: a) uspořádání nosné konstrukce a místa použití listnatého dřeva (tmavší barva; ozn. Laubholz), b) schéma konstrukce prvních tří ráků [89].

Podle [88] je nosná konstrukce nadzemní části objektu je tvořena štíhlými betonovými sloupy, které vynášejí lepené lamelové střešní nosníky. Zastřešena je plocha 42×37 m, konstrukce je dimenzována na vysoké zatížení sněhem (nad 11 kN/m^2). Konstrukčně zajímavé jsou první tři rámy, které jsou nesené pouze třemi podporami, takže rozpětí stropních nosníků je až 19,7 m. Ve hřebeni jsou rámy spojeny kloubově. Z důvodu velkého zatížení byly nosníky navrženy z jasanového lepeného lamelového dřeva s charakteristickou pevností v tahu 40 N/mm^2 . Nejméně o 50 % vyšší pevnost jasanových prvků v ohybu a smyku umožnila

dimenzovat průřezy nosníků o cca 60 % menších oproti smrkovým, použití tvrdého dřeva bylo výhodné i z hlediska lepší možnosti provedení spojů [88].



Obr. 54 Lepené lamelové nosníky s použitím jasanového dřeva v namáhaných částech a) nad podporou [88] b) v místě kloubového spoje rámu [89].

Podle [88] bylo při výrobě jasanových lepených prvků kromě výběru kvalitního dřeva nutné věnovat zvýšenou pozornost procesu zpracování (včetně provádění zubovitých spojů a lepených ploch) a zajištění kvality; únosnost prvků musela být podle [83] z důvodu chybějící legislativy prokázána zkouškami. Protože jasanové dřevo bylo v té době ve Švýcarsku třikrát dražší než smrkové, používalo se podle [83] pouze v nejvíce namáhaných místech konstrukce.

2.3.5.3 Výrobní hala společnosti Siga

Jedná se o přístavbu ke stávajícímu objektu společnosti o půdorysných rozměrech $36 \times 67,5$ m a výšce 10,65 m, kromě samotné výrobní haly obsahuje i kancelářské křídlo [90].



Obr. 55 Výrobní hala společnosti Siga: a) pohled na nosnou konstrukci haly, b) detail uložení příhradového vazníku BauBuche na prefabrikovaném železobetonovém sloupu [90].

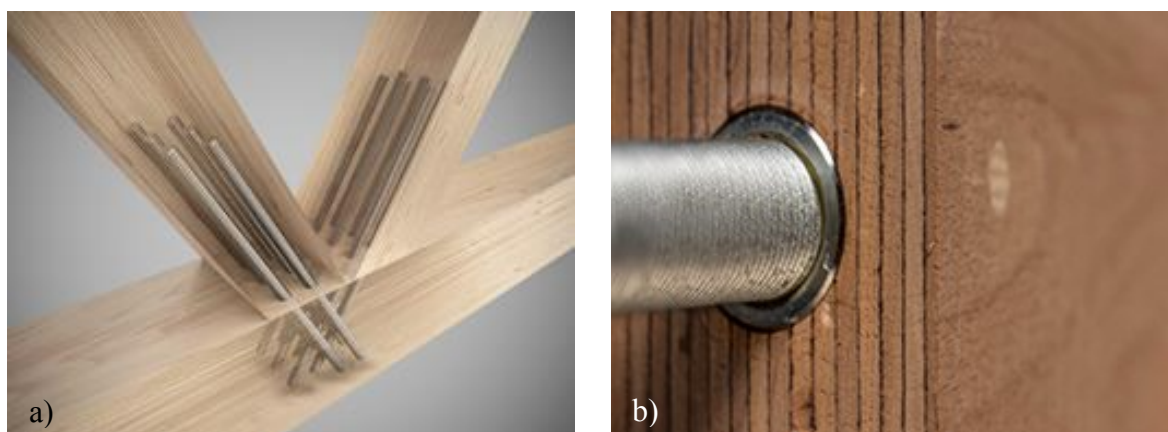
Podle [90] je nosná konstrukce objektu tvořena železobetonovými prefabrikovanými sloupy, které vynášejí dřevěnou střešní konstrukci z různých druhů dřeva. Primární strukturu tvoří příhradové vazníky BauBuche (Obr. 55).

Baubuche (Obr. 56) je podle výrobců [91] a [92] rovnoběžně nebo křížem vrstvené dřevo (LVL) vyrobené z 3 mm bukových dýh, ze kterého jsou dále vyráběny nosníky, desky či panely. Jak uvádí [90], díky své mimořádně vysoké pevnosti umožňuje BauBuche konstrukce s výrazně štíhlejšími rozměry ve srovnání s materiálem z měkkého dřeva, zatímco nákladově efektivní výrobní technologie umísťuje konstrukce BauBuche na stejnou cenovou úroveň jako běžné konstrukce z měkkého dřeva. Na internetových stránkách společnosti Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG [91] lze dále dohledat další reference s použitím tohoto materiálu (Brown Street House v Sydney, kancelářská budova v Augsburgu – Německo, vila v Bergamu – Itálie a další).



Obr. 56 BauBuche – vrstvené bukové dřevo [91].

Příhradové vazníky BauBuche použité ve výrobní hale společnosti Siga v délce 17,40 m mají velmi malou konstrukční výšku a průřezy pásů pouze 30×30 cm, výška příhradových nosníků nad středním sloupkem je 2,40 m. Sekundární konstrukce střechy je tvořena lepenými lamelovými nosníky ze smrku a jedle (Obr. 55). Při výrobě vazníků i pro jejich spojování na místě byl použit spojovací systém GSA tvořený vlepenými ocelovými závitovými tyčemi [90].



Obr. 57 Provedení spojů v systému GSA a) při výrobě vazníků, b) spoje pro montáž na stavbě [92].

2.3.6 Faktory ovlivňující možnost použití listnatého dřeva ve stavebnictví

Současné standardy, platná legislativa

Skutečnost, že jehličnaté dřevo je primární surovinou, která se v současné době používá na dřevěné konstrukce, souvisí i s požadavky současných norem. Pro výrobky vyrobené z listnatého dřeva neexistují žádné informace o vlastnostech souvisejících s výrobou LLD, mechanických vlastnostech nebo požadavcích na lepení.

Pokud je to možné, měl by LLD vyráběný v České republice sestávat z lamel z jehličnatého dřeva, jak je uvedeno v harmonizované normě ČSN EN 14 080 Dřevěné konstrukce – Lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo – Požadavky [55]. Kromě 13 druhů jehličnatého dřeva – smrk (různé druhy), jedle, borovice (různé druhy), modřín (různé druhy), zerav, tsuga, cypřišek je pro LLD výslovně schválen pouze topol. Podle této normy je rovněž zakázáno kombinovat měkké dřevo a tvrdé dřevo v jednom lepeném prvku (jak je uvedeno v kap. 2.3.3.1).

Požadavky na výrobu zubovitého spoje, jak bylo uvedeno v kap. 2.3.3.3, udává norma ČSN EN 15497 [60] v Příloze G. Tato norma definuje požadavky na mechanickou odolnost, pevnost lepení, posuzování a ověřování stálosti vlastností, včetně normativních zkušebních postupů, a to na LLD ze stejných druhů dřeva, jaké definuje i norma ČSN EN 14080 [55].

V Německu se podle [53] LLD z listnatého dřeva vyrábí a prodává, avšak podle německé standardní varianty DIN EN 14080 bylo prakticky nemožné jej použít. Proto byl v roce 2011 v Německu vydán dokument *Zulassungsgegenstand: BS-Holz aus Buche* [57] (*Ustanovení pro lepené lamelové dřevo z buku*), čímž bylo de facto schváleno pro vytápěné interiéry použití LLD také z buku. Dokument s platností 2011 až 2014 obsahuje řadu údajů a ustanovení noremního významu – podrobné informace včetně kritérií třídění, požadavků na zubovité spoje, podmínek lepení a pevnostních vlastností. Obsahuje nejen požadavky na jednotlivé lamely, ale i celé lepené průřezy, dokonce i hybridní (definované na v kap. 2.3.3.1). Podle tohoto dokumentu platí pro požadavky na výrobu LLD norma DIN 1052:2008-12, Dodatek H.2 (tato norma byla nahrazena normou vydanou v roce 2013, respektive německou verzí EC5). Dále jsou v tomto dokumentu uvedeny požadavky na charakteristické pevnosti lamel i zubovitých spojů lamel. Podle tohoto dokumentu musí zubovité spoje splňovat normu DIN EN 385:2007-11, musí být vyrobeny s profilem nejméně 15 × 3,8 mm, přičemž pro jehličnaté dřevo se běžně používá profil 20 × 6,2 mm. Pro navrhování lepených konstrukčních prvků z bukového dřeva platí podle [57] základní norma DIN 1052 a tedy též EC 5.

Vydání tohoto dokumentu značně usnadnilo výrobu LLD z buku, a i když dokument již neplatí, společnosti, které se výrobou LLD z listnatého dřeva zabývají, se jím kvůli nedostatku jiných informací stále řídí.

Ve Švýcarsku je podle [53] obecně použití listnatého dřeva pro nosné konstrukce povoleno, ale ani zde stále neexistují žádné konkrétní třídy pevnosti pro lamely z tvrdého dřeva nebo informace o pevnosti lepení, aby byly splněny požadavky na použití tohoto dřeva pro nosné účely. Ve skutečnosti mohou švýcarské společnosti např. Neue Holzbau AG [56], lepené prvky z listnatého dřeva vyrábět, ale mohou být nabízeny pouze na území Švýcarska.

Tento současný stav norem nejen v České republice, ale v celé Evropě, je pro potenciální výrobce LLD z listnatého dřeva značně omezující.

Třídění listnatého dřeva a třídy jakosti

Pro použití listnatého dřeva ve stavebnictví je důležité jeho správné třídění a zařazování do jakostních tříd. Třídění řeziva je rozdělování jednotlivých kusů řeziva podle určitých rozlišovacích znaků do stanovených tříd za účelem garance jeho technických parametrů a částečné eliminaci nepříznivého účinku vysoké proměnlivosti mechanických vlastností řeziva. Třídění lze realizovat vizuálním ohodnocením nebo strojním tříděním. Při vizuálním třídění konstrukčního řeziva patří k hlavním parametrům třídění rozsah suků, odklon vláken, trhliny a jiné vady dřeva, při strojním třídění je parametrem zpravidla hodnota modulu pružnosti řeziva v ohybu [93].

Základní principy pro pravidla vizuálního třídění jsou uvedeny v normě ČSN EN 14081-1 [94], v České republice pak platí pro třídění jehličnatého řeziva norma ČSN 73 2824-1 [95], která rozlišuje podle vizuálně zjištěných znaků tři třídy: S 7, S 10 a S 13 [68]. Ve stejném znění je norma platná i v Německu (DIN 4074-1:2012) a Rakousku (ÖNORM DIN 4074-1:2012), švýcarské předpisy jsou založeny na obdobném postupu [93].

Dále platí pro jehličnaté dřevo ČSN EN 1611-1 [96], která udává dva postupy pro třídění – G2 (posuzují se plochy) a G4 (posuzují se plochy a boky), třídy jsou pak označeny značkou postupu a číslem třídy 0–4 (např. G2-1). Posuzuje se velikost a počet suků, průběh vláken, trhliny a další vady.

Pro třídění dubového a bukového dřeva platí ČSN EN 975-1, kde jsou jakostní třídy označeny podle druhu dřeva (Q pro dub, F pro buk), druhu výrobku (B kmenované řezivo, S jednotlivě vybírané řezivo, F přířezy a omítané řezivo, P hranoly, D opracované řezivo)

a jakostních tříd (A mimořádně dobrá jakost, 1, 2 další jakostní třídy). Posuzované znaky jsou suky, trhliny, točivost a odklon vláken a další vady dřeva.

Třídění topolového dřeva stanovuje norma ČSN EN 975-2 [97], kde jsou stanoveny požadavky pro zařazení evropských topolů do tříd 1–4 podle velikosti a počtu suků, průběhu vláken, trhlín a dalších vad.

Přiřazení tříd listnatých dřevin k třídám pevnosti je uvedeno v [98], kde jsou z listnatých dřevin rostoucích v České republice uvedeny javor, buk, dub a jasan. Třídění těchto dřevin stanovuje podle [98] ze všech států pouze Německo, a to v normě DIN 4074-5:2003, která dělí listnaté dřevo do tříd LS7, LS10 a LS13 [53]. Přehled evropských norem pro třídění je uveden v Příloze A normy ČSN EN 1912 [98] (Tab. 19).

Tab. 19 Přiřazení tříd listnatých dřevin k třídám pevnosti [98].

dřevina	třída pevnosti	stát, který publikoval pravidla třídění	třída v normě daného státu
javor (<i>Acer pseudoplatanus</i>)	D30	Německo	LS 10 a lepší
buk (<i>Fagus sylvatica</i>)	D35 D40	Německo	LS 10 a lepší LS 13
dub (<i>Quercus petraea</i> , <i>Quercus robur</i>)	D30	Německo	LS10 a lepší
jasan (<i>Fraxinus excelsior</i>)	D40	Německo	LS 10 a lepší

V normě ČSN EN 338 [99] jsou potom uvedeny charakteristické a průměrné hodnoty pevností, modulu pružnosti a objemové hmotnosti příslušné k jednotlivým pevnostním třídám D18–D80. Vybrané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 20.

Tab. 20 Vybrané třídy pevnosti a charakteristické a průměrné hodnoty listnatého dřeva v N/mm² [99].

	D30	D35	D40	D45	D50	D60	D70	D80
$f_{m,k}$	30	35	40	45	50	60	70	80
$E_{m, mean}$	11,1	12,0	13,0	13,5	14,0	17,0	20,0	24,0
ρ_{mean}	640	650	660	700	740	840	960	1080

Nevýhodou vizuálního třídění je, že tato metoda postrádá objektivitu a není dostatečně přesná, neboť možné vady uvnitř prvku nemohou být detekovány. Pro budoucí použití listnatého dřeva ve stavebnictví je však správné zařazení řeziva důležité. Bylo zjištěno, že prvky z listnatého dřeva by mohly být často zařazeny do vyšších tříd pevnosti, než do jakých jsou zařazovány pomocí vizuálního třídění. Nejvíce prokazatelným třídícím kritériem je kromě velikosti a počtu suků dynamický modul pružnosti, který může být stanoven několika způsoby, např. pomocí zvuku nebo frekvence vibrací. Naopak objemová hmotnost není pro třídění

listnatých dřevin vhodným kritériem, protože touto metodou jsou často do nižší třídy zařazeny prvky, které dosahují modulu pružnosti a pevnosti vyšších pevnostních tříd [53].

Výtěžnost a zpracování listnatého dřeva

Možnost použití dřeva závisí i na jeho výtěžnosti, která se potom projevuje na ceně řeziva. Výtěžnost závisí na průměru kmene, kvalitě dřeva, způsobu a technologii řezání. Výnos se zvyšuje při zvětšování průměru kulatiny. Zatímco pro jehličnaté dřevo je výtěžnost dřeva mezi 50–71 %, u listnatého dřeva se výtěžnost pohybuje mezi 18–85 % a silně závisí na konečném produktu. Výtěžnost dřeva souvisí i s polohou výřezu po výšce kmene, protože kvalita dřeva v kmeni kolísá. Nej kvalitnější dřevo je možné získat z části kmene nejbližší ke kořenům, zatímco dřevo kmene v koruně bývá používáno zejména v průmyslu a energetice. Kvalita řeziva také závisí na tom, jestli se jedná o jádro nebo bělové dřevo (viz Obr. 12 v kap. 2.2.1.2) [53].

Náročnost zpracování dřeva závisí na technologii řezání a růstových a anatomických vlastnostech dřeva. Obtížnost řezu ovlivňuje tvrdost, struktura vlákn, obsah pryskyřice a tvar kmene. Na rozdíl od jehličnatých dřevin jsou listnaté dřeviny charakterizovány obtížným zpracováním. Především díky vysoké tvrdosti jsou pily vystaveny většímu odporu, důsledkem čehož se zvyšuje spotřeba energie, zkracuje životnost nástrojů a zmenšuje objem výroby oproti jehličnatým dřevinám. Důraz je třeba klást zejména na ostrost nástrojů, protože dlouhá vlákna listnatého dřeva mohou být tupými nástroji vytlačena nebo odtržena [53].

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce je výzkum a ověření vlastností lepených lamelových prvků (LLD) založených na využití v současnosti málo využívaných listnatých dřevin, a to pro použití v nosných konstrukcích pozemních staveb.

Disertační práce si klade tyto dílčí cíle:

1. vymezení oblasti klimatolerantních dřevin aplikovatelných v konstrukcích pozemních staveb,
2. experimentální ověření vlastností klimatolerantních dřevin,
3. analýza nejvhodnější dřeviny pro danou aplikaci,
4. návrh lepeného prvku z této dřeviny včetně
 - a. ověření funkčnosti geometrie zubovitého spoje,
 - b. popisu chování LLD nosníku na bázi listnatých dřevin při zatížení.

Jednotlivé cíle na sebe navazují, jak je zobrazeno na Obr. 58.



Obr. 58 Návaznost cílů disertační práce.

Na základě výsledků první části – určení vlastností klimatolerantních dřevin – byla provedena analýza vyhodnocení nejvhodnějšího druhu klimatolerantní dřeviny k použití pro konstrukce pozemních staveb. Výsledky této analýzy jsou dále využity pro návrh lepených nosníků.

3.1 Vymezení oblasti klimatolerantních dřevin aplikovatelných v konstrukcích pozemních staveb

Pro naplnění tohoto cíle byla provedena analýza druhů klimatolerantních listnatých dřevin vhodných pro použití v konstrukcích pozemních staveb, a to zejména na základě informací z odborné literatury.

3.2 Ověření vlastností klimatolerantních dřevin

Byl formulován soubor vlastností dřevin důležitých pro použití v konstrukcích staveb se zaměřením na LLD a provedeno experimentální určení vybraných vlastností jednotlivých druhů a jejich porovnání v rámci souboru vybraných listnatých dřevin a se smrkem jako referenční dřevinou. Další vlastnosti byly převzaty z odborné literatury.

3.3 Analýza nejvhodnější dřeviny (nejvhodnějších dřevin) pro danou aplikaci

Pro naplnění tohoto cíle byla provedena analýza vhodnosti použití jednotlivých variant (druhů dřevin) pro použití jako konstrukčního materiálu pro pozemní stavby. Matematickým výpočtem bylo provedeno srovnání jednotlivých variant a vyhodnocení nejvhodnější dřeviny.

3.4 Ověření funkčnosti geometrie zubovitého spoje

V rámci únosnosti LLD hraje klíčovou roli únosnost nejslabších míst, kterými jsou spoje, přičemž pro únosnost spojů je jejich geometrie jedním z parametrů, na kterých únosnost spoje závisí. Experimentální ověření spoje bylo provedeno pro podélné napojování lamel z bukového dřeva a srovnáno s dostupnou literaturou.

3.5 Popis chování LLD nosníku na bázi listnatých dřevin

Chování LLD nosníku bylo zkoumáno experimentálně z hlediska jeho mechanických vlastností. Zkoumány byly nosníky na semi-scale vzorcích, a to jak z jednoho druhu dřeviny,

tak kombinovaného z více druhů. Bylo provedeno ověření jeho únosnosti ve srovnání se smrkovým lepeným nosníkem a vymezeny podmínky pro používání nosníků z listnatého dřeva.

3.6 Prostředky k naplnění cílů

Použité měřicí zařízení bylo dostupné v rámci přístrojového vybavení Ústavu pozemního stavitelství, případně Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, a to jak na pracovišti Veveří 95, tak na výzkumném Centru AdMaS.

V rámci přístrojů, softwaru a vybavení byly použity:

- mechanický lis Heckert FPZ 100/1,
- elektrohydraulický zatěžovací systém INOVA na lamičací dráze Centra AdMaS, hala P1,
- software Catman Data Acquisition Software,
- 8-kanálová měřicí ústředna HBM Spider 8,
- indukčnostní snímač dráhy Ld HBM Typ WA/50 mm a WA/100 mm o rozsahu 50 mm a 100 mm
- posuvné měřítko Mahr 18 EX (rozsah 500 mm) a Mahr 16 EX (rozsah 250 mm),
- laboratorní váha Radwag PS 6000.R1 s váživostí 6,1 kg a přesností 0,01 g,
- váha Sartorius AG Göttingen s váživostí 20 kg a přesností 0,1 g,
- elektrický odporový vlhkoměr PROTIMETER PLC Timbermaster,
- sušicí pec Memmert UFE 800 (laboratorní sušárna).

4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

4.1 Teoretické metody

4.1.1 Studium dostupných podkladů

Obecné poznatky o listnatém dřevě, jeho vlastnostech, použití v historii, o lepeném lamelovém dřevě obecně, lepených spojích apod. byly čerpány z dostupné odborné literatury tuzemské, ale i zahraniční. Jedná se zejména o odborné knihy, VŠKP práce, technické normy, odborné články, vědecké články v databázích Scopus a Thomson Reuters a články v odborných časopisech.

Nedílnou součástí studia bylo také sledování a řešení problémů na internetu, vyhledávání článků, účast na konferencích a v neposlední řadě odborné konzultace na danou problematiku.

4.1.2 Matematická analýza

Jednou z dalších součástí dizertační práce je multikriteriální analýza pro určení pořadí výhodnosti použití jednotlivých druhů tvrdého dřeva pro konstrukce pozemních staveb. Pro multikriteriální analýzu byla použita metoda PROMETHEE (Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation). Metoda je považována za jednu z nejznámějších a je široce používána k řešení praktických problémů rozhodování. Základní prvky metody PROMETHEE představil Bransen v roce 1982 [100]. Výsledky hodnocení touto metodou závisí na výběru preferenční funkce pro každé kritérium popisující zkoumaný objekt a stanovení jejích parametrů.

Výpočet pomocí této metody se podle [101] skládá z pěti kroků:

- krok 1: párové srovnání alternativ pro každé kritérium,
- krok 2: volba příslušné preferenční funkce pro každé kritérium,
- krok 3: výpočet preferenční relace,
- krok 4: analýza všech kladných a záporných relací a určení nejlepší z uvažovaných alternativ,
- krok 5: určení pořadí alternativ v sestupném pořadí.

Předtím, než je možno učinit krok 1 je však nutno vybrat hodnocené varianty, stanovit kritéria hodnocení a přidělit jednotlivým kritériím váhy. Struktura celého rozhodovacího procesu je zobrazena na Obr. 59.



Obr. 59 Struktura rozhodovacího procesu.

4.1.2.1 Výběr variant

Výchozím kritériem pro výběr hodnocených dřevin byla jejich očekávaná porostní plocha v horizontu přibližně 10 let, pro experimentální určení vlastností listnatých dřevin použitelné pro konstrukce staveb jsou vybrány klimatolerantní druhy listnatých dřevin s největším podílem v doporučené skladbě lesa. Rovněž bylo přihlédnuto k očekávaným vlastnostem jednotlivých dřevin podle dostupné literatury, tak aby odpovídaly předpokládanému použití pro konstrukční účely.

Do multikriteriálního hodnocení vstupovaly jako varianty tyto dřeviny:

- Buk obecný (*Fagus sylvatica*),
- Dub letní (*Quercus robur*),
- Habr obecný (*Carpinus betulus*),
- Javor mléč (*Acer platanoides*).

4.1.2.2 Kritéria hodnocení

Cílem rozhodovacího procesu bylo nalezení nejvhodnějšího druhu tvrdého dřeva pro použití v nosných konstrukcích pozemních staveb. Vlastnostmi dřeva obecně kladně hodnocenými vzhledem k jiným materiálům jsou zejména jeho nízká hmotnost, snadná opracovatelnost a spojovatelnost a velká pevnost. Velkou roli hraje rovněž cena, která úzce souvisí s nabídkou konkrétního řeziva na trhu. Při užití pro nosné prvky je důležitá také tvarová stálost materiálu, která je u listnatých dřevin obecně horší oproti dřevinám jehličnatým. Tuto vlastnost lze ovšem poměrně dobře eliminovat vrstvením, tedy použitím konstrukčních prvků z lepeného (LLD), případně křížem lamelovaného dřeva (CLT).

Kritéria hodnocení byla volena tak, aby sloužila k výstižnému posouzení jednotlivých variant, tedy aby postihla vlastnosti, které mají největší vliv na cenu řeziva, jednoduchost provádění konstrukcí z daného materiálu a jeho fyzikální a mechanické vlastnosti.

Použita byla kritéria kvantitativního i kvalitativního charakteru, přičemž některá z nich jsou maximalizační (výnosová, ozn. max), jiná minimalizační (nákladová, ozn. min). U kritérií výnosového typu podle [102] rozhodovatel preferuje vyšší hodnoty (např. pevnost), u nákladových kritérií nižší hodnoty (např. cena).

Zvolena byla tato kritéria hodnocení:

- pevnost v ohybu (*),
- modul pružnosti v ohybu (*),
- pevnost v tlaku (*),
- objemová hmotnost (*),
- sesychání (bobtnání),
- výskyt suků, rovnovláknitost,
- opracovatelnost,
- nárůst porostní plochy dřeviny.

Hodnoty vlastností označených výše (*) byly experimentálně testovány na zkušebních tělesech hodnocených dřevin (viz kap. 4.2), zdrojem pro získání hodnot zbývajících vlastností byla odborná literatura.

4.1.2.3 Kriteriaální matice

Vstupní hodnoty se zapisují do kriteriaální matice **R**, která se následně modifikuje do tvaru se všemi kritérii maximalizačními, odečtením hodnoty kritéria od nejhorší možnosti

minimalizačního kritéria; tedy na hodnocení, o kolik je varianta lepší než nejhorší možnost [103]. Upravená kritériální matice \mathbf{R}_M má tvar (2):

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc}
 & i_1 & \cdots & i_m \\
 & \max & \max & \max \\
 a_1 & \left[\begin{array}{ccc} \square & \cdots & \square \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \square & \cdots & \square \end{array} \right] & &
 \end{array}
 \end{array} \quad (2)$$

kde $a_1, a_2 \dots a_n, a = 1, 2, \dots, n$ jsou hodnocené varianty, $i_1, i_2 \dots i_m, i = 1, 2, \dots, i, j, \dots, m$ jsou kritéria hodnocení; max je označení maximalizačního kritéria.

4.1.2.4 Váhy kritérií

Každému kritériu z vybraného souboru kritérií byla přidělena váha, která určuje jeho důležitost. Pro přidělení vah existuje mnoho metod přehledně popsanych např. v [102], [103], [104] nebo [105]. Pro účely tohoto hodnocení byla vybrána Metoda postupného rozvrhu vah (dále MPRV) a Metoda kvantitativního párového srovnávání, tzv. *Saatyho metoda* (dále MKPS).

Kritéria byla nejprve seskupena do dílčích skupin podle příbuznosti jejich náplně. Každé skupině kritérií byla podle MPRV přiřazena normovaná váha skupiny, každému kritériu byla následně přidělena normovaná váha kritéria. Výsledná váha kritéria je potom součinem normované váhy skupiny a normované váhy kritéria [103], [104], [105].

Pro přiřazení normové váhy skupiny byla použita MKPS, která podle [102] kromě výběru preferovaného kritéria určuje pro každou dvojici kritérií také velikost této preference, která nabývá hodnot od 1 (kritéria jsou stejně významná) do 9 (první kritérium je absolutně významnější než druhé). Velikost preferencí i -tého kritéria proti j -tému se uspořádají do Saatyho matice \mathbf{S} , jejíž prvky s_{ij} představují podle [102], odhady podílů vah kritérií:

$$s_{ij} \approx \frac{v_i}{v_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

Pokud je matice \mathbf{S} alespoň dostatečně konzistentní (určení indexu konzistence viz [104]), lze váhy kritérií vypočítat normalizovaným geometrickým průměrem řádků matice \mathbf{S} podle vztahu (4).

$$v_{sk,i} = \frac{\left[\prod_{j=1}^m S_{ij} \right]^{\frac{1}{m}}}{\sum_{k=1}^m \left[\prod_{j=1}^m S_{kj} \right]^{\frac{1}{m}}}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

4.1.2.5 Hodnocení metodami PROMETHEE

Metody PROMETHEE porovnávají všechny alternativy A_j a A_k , stanovením preferenční relace $\pi(A_j, A_k)$. Dále se provádí opačná operace, výpočet vztahu mezi alternativami A_k and A_j , $\pi(A_k, A_j)$. Zpravidla $\pi(A_j, A_k) \neq \pi(A_k, A_j)$ [106].

Preferenční relace $\pi(A_j, A_k)$ se vypočítá podle [107] ze vztahu:

$$\pi(A_j, A_k) = \sum_{i=1}^m v_i p_t(d_i(A_j, A_k)), \quad (5)$$

kde v_i je váha i -tého kritéria R_i , $\sum_{i=1}^n v_i = 1$, $d_i(A_j, A_k) = r_{ij} - r_{ik}$ je rozdíl mezi hodnotami r_{ij} a r_{ik} i -tého kritéria R_i alternativ A_j a A_k ; $p_t(d) = p_t(d_i(A_j, A_k))$ je t -tá preferenční funkce vybraná pro i -té kritérium [104].

Pro účely tohoto hodnocení byla pro všechna kritéria vybrána z přehledu preferenčních funkcí uvedených v [107] nebo [106] značených I–VI preferenční funkce V (kritérium s indifferenční oblastí a lineární preferencí):

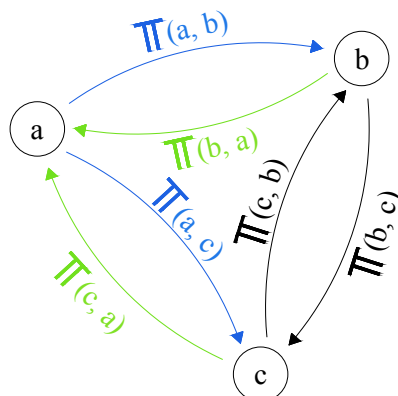
$$p_t(d) = \begin{cases} 0, & \text{když } d \leq q^*, \\ \frac{d - q^*}{p^* - q^*}, & \text{když } q^* < d < p^*, \\ 1, & \text{když } d > p^*, \end{cases} \quad (6)$$

kde $p_t(d)$ je preferenční funkce, d je rozdíl mezi hodnotami kritéria pro dvě srovnávané varianty, parametr q^* udává šíři indifferenční oblasti, tedy oblasti, kde jsou hodnoty $p_t(d)$ nulové, parametr p^* udává šíři oblasti lineární preference.

Metody PROMETHEE podle [106] počítají součet všech kladných (výstupních) relací každé j -té alternativy $F_j^+ = \sum_{k=1}^m \pi(A_j, A_k)$ (7) a součet všech záporných (vstupních) relací $F_j^- = \sum_{k=1}^m \pi(A_k, A_j)$, ($j = 1, 2, \dots, m$) (8). Schéma relací je zobrazeno na Obr. 60.

Analýzou hodnot F_j^+ a F_j^- , ($j = 1, 2, \dots, m$) metoda PROMETHEE I určuje nejlepší z uvažovaných alternativ. Metoda PROMETHEE II podle [106] vypočítává rozdíl mezi těmito

vztahy $F_j = F_j^+ - F_j^-$ (9) a určuje pořadí alternativ v sestupném pořadí podle rozdílů mezi hodnotami F_j .



Obr. 60 Preferenční relace; výstupní toky varianty *a* jsou zobrazeny modře, výstupní toky varianty *a* zobrazeny zeleně.

4.2 Experimentální metody

Experimentálně byly určovány mechanické, ale i některé fyzikální vlastnosti, neboť většina literatury (např. [9], [28], [33], [108] a další) neuvádí hodnoty pro všechny dřeviny. Tedy nelze vhodně tyto hodnoty porovnat, a pokud je porovnat lze, jsou mezi hodnotami uváděnými v různé literatuře poměrně značné odchylky, např. objemová hmotnost dubu a habru se podle [9] liší minimálně – o 0,1 %, podle [28] se liší o 17,7 %. Proto bylo třeba tyto vlastnosti určit, případně ověřit.

4.2.1 Experimentální určení vlastností listnatých dřevin

Experimentální zkoušení vlastností listnatých dřevin probíhalo v laboratořích Ústavu stavebního zkušebnictví a Ústavu pozemního stavitelství. Zkoušky probíhaly podle současných platných norem, zejména ČSN EN 380 [109], ČSN EN 384 [110], ČSN EN 408 [111], EN 13183-1 [112], ČSN EN 302-1 [113], ČSN EN 302-2 [114], ČSN EN 14080 [55], ČSN EN 15497 [60] a dalších.

4.2.1.1 Zkoušené druhy dřevin, vzorky

Kritéria pro výběr druhu zkoušených dřevin byla shodná s kritérii pro hodnocení multikriteriální analýzou a byla popsána v kap. 4.1.2.1.

Experimentální zkoušky byly provedeny pro tyto druhy listnatých dřevin:

- Buk obecný (*Fagus sylvatica*),

- Dub letní (*Quercus robur*),
- Habr obecný (*Carpinus betulus*),
- Javor mlč (*Acer platanoides*).

4.2.1.2 Sledované vlastnosti

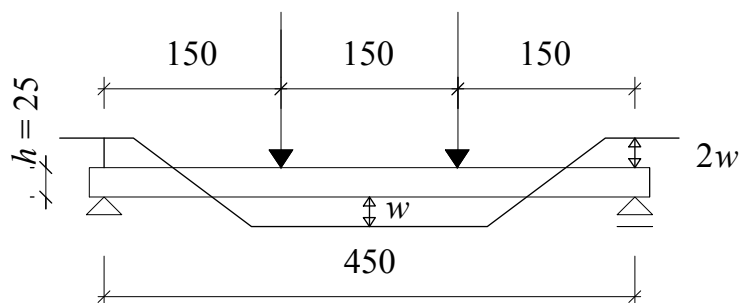
V rámci experimentů pro porovnání dřevin byly sledovány fyzikální a mechanické vlastnosti, které jsou důležité pro použití dřeva jako konstrukčního materiálu. Jedná se o následující vlastnosti:

- objemová hmotnost ρ ,
- pevnost ve čtyřbodovém ohybu f_m ,
- modul pružnosti ve čtyřbodovém ohybu E_{ml} ,
- pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny $f_{c,0}$.

4.2.1.3 Pevnost a modul pružnosti ve čtyřbodovém ohybu

Pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu byly experimentálně určovány na zkušebních tělesech o rozměrech $25 \times 25 \times 475$ mm. Zkoušky pevnosti a modulu pružnosti v ohybu byly prováděny v rámci jedné zkoušky, celkem bylo zkoušeno 30 ks zkušebních těles od každého druhu dřeviny.

Zkouška čtyřbodovým ohybem probíhala podle normy ČSN EN 408 [111]. Spočívá v symetrickém zatěžování zkušební tělesa dvěma břemeny. Schéma uspořádání zkoušky je zobrazeno na Obr. 61. Zkušební těleso musí být prostě podepřeno, přičemž vzdálenost podpor je $18h$, kde h je výška zkušební tělesa. Břemena jsou umístěna symetricky ve třetinách rozpětí podpor ($6h$).



Obr. 61 Uspořádání zkoušky pro měření pevnosti a modulu pružnosti v ohybu.

Rychlost zatěžování nesmí podle [111] překročit $(0,003h)$ mm/s, což při rozměru vzorků odpovídá 4,5 mm/min, a zároveň do dosažení maximální síly F_{\max} musí být v čase $t = (300 \pm 120)$ s. Rychlost zatěžování byla konstantní a byla zvolena 4 mm/min, průměrná doba porušení vzorků byla průměrně pro buk 197 s, u dubu 210 s, u habru 280 s, u javoru 279 s. Tělesa byla zatěžována až do porušení.

Zkouška byla prováděna za pomoci mechanického lisu Heckert FPZ 100/1 a zkušebního přípravku vyrobeného na míru zkušebními tělesům kolegou Ing. et Ing. Jakubem Dohnalem v rámci projektu SV FAST-J-18-5566 [115]. Při zatěžování vzorku byl přípravek ke zkušebnímu tělesu přiložen nad jednou podporou a uprostřed rozpětí, nad druhou podporou byl umístěn indukčnostní snímač dráhy Ld HBM Typ WA/50 mm nebo WA/100 mm (podle zkoušené dřeviny), který měřil dvojnásobný svislý posun oproti posunu uprostřed rozpětí. V souladu s normou [111] je dále v textu tento svislý posun měřený snímačem dráhy označován jako deformace w .

V průběhu zkoušky bylo zaznamenáno zatížení F v N, deformace w v mm a čas t v s.



Obr. 62 Zkouška vzorku dřeviny ve čtyřbodovém ohybu [archiv autora].

Vyjádření výsledků pevnosti v ohybu

Ze zjištěné maximální působící síly F_{\max} byla pevnost v ohybu stanovena podle [111] vztahem:

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot a}{b \cdot h^2}, \quad (10)$$

kde je f_m pevnost v ohybu, v N/mm²; F_{\max} maximální zatížení v N; h je výška a b šířka průřezu v mm; a je vzdálenost mezi působištem zatížení a nejbližší podporou v mm, přičemž platí $a = 5h$.

Vyjádření výsledků modulu pružnosti v ohybu

Použitím hodnot získaných ze zkoušky se sestojí graf závislosti zatížení F (svislá osa) na deformaci w (vodorovná osa). Část grafu mezi $0,1F_{\max}$ a $0,4F_{\max}$ se použije pro regresní analýzu. Určí se nejdelší úsek této části, jehož součinitel korelace je 0,99 nebo lepší. Za předpokladu, že tento úsek zahrnuje nejméně rozmezí $0,2F_{\max}$ až $0,3F_{\max}$ se podle [111] vypočítá lokální modul pružnosti $E_{m,l}$ pomocí vztahu:

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)}, \quad (11)$$

kde je a vzdálenost mezi působištem zatížení a nejbližší podporou při ohybové zkoušce, v mm; l_1 měřená délka pro stanovení modulu pružnosti, v mm; $F_2 - F_1$ přírůstek zatížení v N na regresní přímce se součinitelem korelace 0,99 nebo lepším, $w_2 - w_1$ přírůstek deformace v mm odpovídající $F_2 - F_1$ a I je moment setrvačnosti průřezu v mm⁴.

Přepočet výsledků na hodnoty odpovídající 12% vlhkosti:

Neboť nebyla zkušební tělesa klimatizována ve standardním prostředí s teplotou $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí $(65 \pm 5) \%$ a vlhkost vzorků se tudíž pohybovala kolem 8–9 %, byly výsledky přepočteny tak, aby odpovídaly pevnostem vzorků s 12% vlhkostí.

Pevnost v ohybu byla přepočítána podle ČSN 49 0115 [116] a to podle vztahu (12):

$$f_{m,12} = f_{m,\omega} [1 + \alpha \cdot (\omega - 12)], \quad (12)$$

kde je $f_{m,12}$ pevnost v ohybu při 12% vlhkosti, v N/mm²; $f_{m,\omega}$ pevnost v ohybu při vlhkosti ω , v N/mm²; α opravný vlhkostní koeficient závisející na způsobu zatěžování, pro ohyb je pro všechny dřeviny $\alpha = 0,04$; ω vlhkost dřeva, v %.

Modul pružnosti v ohybu byl přepočítán podle ČSN 49 0116 [117] a to dle vztahu (13), který je možno použít pro vlhkosti $(12 \pm 3) \%$:

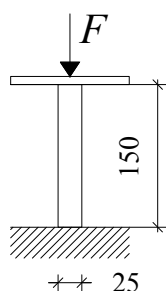
$$E_{12} = \frac{E_\omega}{1 - \alpha \cdot (\omega - 12)}, \quad (13)$$

kde je E_{12} modul pružnosti při 12% vlhkosti v kN/mm^2 ; E_ω modul pružnosti při vlhkosti ω v kN/mm^2 ; α opravný koeficient pro vlhkost, pro všechny dřeviny je $\alpha = 0,01$.

4.2.1.4 Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny

Destruktivní zkoušky pro určení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny byly provedeny rovněž podle normy ČSN EN 408 [111]. Principem zkoušky je zatěžování zkušební tělesa a odečet maximálního zatížení při jeho porušení v tlaku. Zkušební tělesa byla o rozměrech $25 \times 25 \times 300 \text{ mm}$ a v počtu 30 ks od každého druhu dřeviny.

Zkušební tělesa byla zatěžována centricky, zatěžovací plochy byly opracovány tak, aby byla zajištěna jejich rovinnost, vzájemná rovnoběžnost a kolmost k ose zkušební tělesa. Schéma uspořádání zkoušky je uvedeno na Obr. 63.



Obr. 63 Uspořádání zkoušky pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny [archiv autora].

Rychlost zatěžování byla nastavena podle požadavků normy [111] tak, aby se dosáhlo největšího zatížení v průběhu $(300 \pm 120) \text{ s}$. Skutečná rychlost zatěžování byla 4 mm/min , maximální síla byla dosažena průměrně u buku po 263 s, u dubu po 242 s, u habru po 258 s a u javoru po 256 s.

Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny $f_{c,0}$ byla určena podle [111] pomocí vztahu:

$$f_{c,0} = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (14)$$

kde je $f_{c,0}$ pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny v N/mm^2 , F_{\max} největší zatížení v N, A plocha průřezu v mm^2 .

Výsledky byly opět přepočítány pro 12% vlhkost podle ČSN 49 0110 [118] pomocí vztahu:

$$f_{c,0,12} = f_{c,0,\omega} \left[1 + \alpha \cdot (\omega - 12) \right], \quad (15)$$

kde $f_{c,0,12}$ pevnost v tlaku při 12% vlhkosti, v N/mm²; $f_{c,0,\omega}$ pevnost v tlaku při vlhkosti ω , v N/mm²; α opravný vlhkostní koeficient, pro všechny dřeviny $\alpha = 0,04$; ω vlhkost dřeva, v %.

4.2.1.5 Objemová hmotnost

Při všech zkouškách byla pro každé zkušební těleso rovněž určována objemová hmotnost podle normy ČSN 49 0108 [119] Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno na celých neporušených vzorcích, tedy před provedením zkoušek.

Výpočet a vyjádření výsledků

Objemová hmotnost ρ_ω se vypočítá jako poměr hmotnosti zkušební tělesa k jeho objemu podle vztahu:

$$\rho_\omega = \frac{m_\omega}{V_\omega} = \frac{m_\omega}{h \cdot b \cdot l}, \quad (16)$$

kde ρ_ω je objemová hmotnost zkušební tělesa při vlhkosti ω v kg/m³, m_ω hmotnost zkušební tělesa při vlhkosti ω v kg, V_ω objem zkušební tělesa při vlhkosti ω v m³, přičemž $V_\omega = h \cdot b \cdot l$ a h , b a l jsou rozměry zkušební tělesa v m.

Objemová hmotnost ρ_ω se přepočítá na hodnotu ρ_{12} odpovídající 12% vlhkosti podle [119] pomocí vztahu (17) platného pro vlhkost v rozsahu od 7 % do 17 %:

$$\rho_{12} = \rho_\omega \left[1 - \frac{(1 - K)(\omega - 12)}{100} \right], \quad (17)$$

kde K je koeficient objemového sesychání při změně vlhkosti o 1 %, $K \approx 0,85 \cdot 10^{-3} \rho_\omega$ pro objemovou vlhkost vyjádřenou v kg/m³.

4.2.1.6 Vlhkost

Vlhkost byla určena na všech vzorcích váhovou metodou podle normy EN 13183-1 [112]. Obsah vlhkosti byl stanoven na celých zkušebních tělesech. Každé zkušební těleso bylo zváženo ihned po provedení zkoušky (na pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu, pevnost

v tlaku) a vysušeno v sušicí peci Memmert UFE 800, v níž byla udržována teplota 105 °C. Následně byla tělesa znovu zvážena ihned po vyjmutí ze sušárny.

Výpočet a vyjádření výsledků

Vlhkost ω se vypočítá jako procentní podíl hmotnosti podle [112] pomocí vztahu (18):

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100, \quad (18)$$

kde ω je vlhkost v %; m_1 hmotnost zkušební tělesa před sušením v g; m_0 hmotnost vysušeného zkušební tělesa v g.

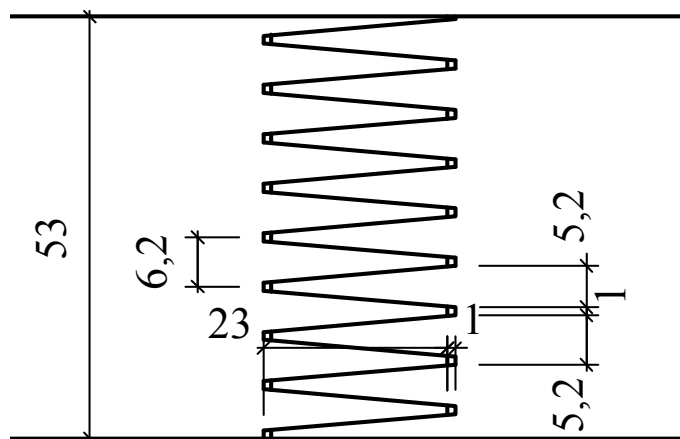
4.2.2 Experimentální zkoušení únosnosti zubovitých spojů pro podélné napojování lamel listnatého dřeva

V rámci experimentů pro ověření funkčnosti zubovitého spoje byla sledována pevnost v ohybu konstrukčního dřeva spojovaného zubovitým spojem. Zkušební tělesa byla z bukového dřeva. Tento druh byl zvolen na základě výsledků analýzy popsanych v kap. 5.3. Zkoušeny byly vzorky se zubovitým spojem a srovnávány s referenčními vzorky, které byly stejných rozměrů, ale beze spoje.

4.2.2.1 Příprava vzorků

Protože nebyl nalezen v České republice dodavatel, který by dokázal vyrobit vzorky z tvrdého dřeva a s jinou délkou ozubu než 15 mm, byly vzorky připraveny v laboratorních podmínkách. Při přípravě vzorků byly dodrženy požadavky normy ČSN EN 14080 [55] uvedené v Příloze I, i když se tato norma omezuje pouze na prvky vyrobené zejména z jehličnatých druhů. Respektovány byly rovněž požadavky výrobce lepidla.

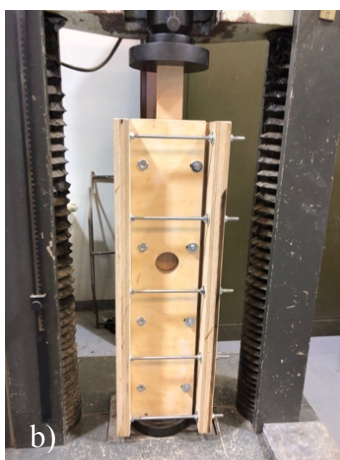
Lamely o profilu 53 mm × 33 mm byly vyfrézovány pomocí frézovacích nožových plátů. Geometrie zubovitého spoje (Obr. 64) byla následující: délka ozubů 23 mm, rozteč ozubů 6,2 mm, vůle v zubovitém spoji 1 mm. Byl vytvořen stojatý spoj (zuby jsou viditelné shora/zespol lamely), geometrie ozubů umožňuje samosvornost spoje a vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 14 080 [55].



Obr. 64 Geometrie zubovitého spoje.

Po frézování byly lamely ihned lepeny. Pro lepení bylo použito jednosložkové, za vlhka tvrdnoucí polyuretanové lepidlo pro lepení dřevěných materiálů Kestopur 1030 finského výrobce Kiilto [120]. Toto lepidlo je pro výrobu LLD v České republice běžně používáno. Podle technického listu výrobce [120] je vhodné pro délkové napojování dřeva (finger jointing), délkově napojené vrstvené dřevo, přípravu spojů s vynikající odolností vůči vlhkosti a lepení vlhkého dřeva. Vlhkost lamel před lepením ω byla orientačně měřena elektrickým odporovým vlhkoměrem PROTIMETER PLC Timbermaster a dosahovala průměrně 11,3 %. Lepidlo bylo nanášeno na oba lepené povrchy pomocí zubovité šablony, a to v celkové gramáži 250 g/mm^2 .

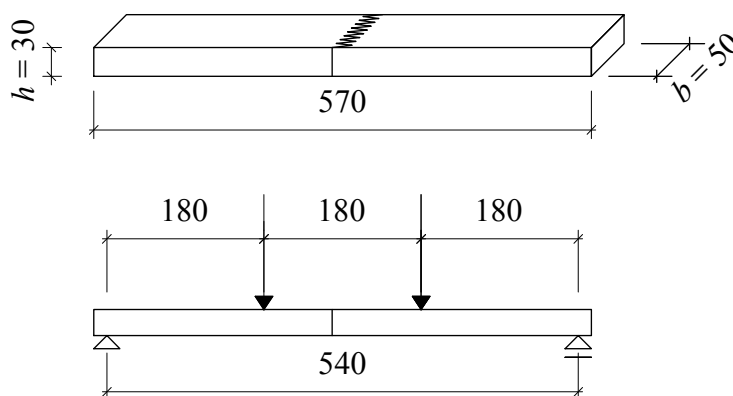
Lisování spoje probíhalo za pomoci přípravku, který přispěl k zajištění rovinnosti prvku po slepení. Lisovací tlak $7,5 \text{ N/mm}^2$ a čas lisování 2 s byly v souladu s ČSN EN 14080 [55]. Vytvrzování probíhalo ve standardních laboratorních podmínkách ($\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 60 \text{ \%}$) po dobu 2 týdnů.



Obr. 65 a) Nanášení lepidla pomocí zubovité šablony (vlevo), b) lisování spoje pomocí přípravku, c) vytlačování lepidla při lisování na všech površích zubovitého spoje [archív autora].

4.2.2.2 Zkoušky pevnosti ve čtyřbodovém ohybu

Zkoušky lamel se zubovitými spoji se podle [55] provádí buď ohybem na ležato nebo tahem. Z důvodu lepší proveditelnosti zkoušky byla únosnost ověřována ohybem. Pevnost v ohybu byla experimentálně určována v souladu s normou ČSN EN 408 [111], rozměry zkušebních vzorků byly upraveny na $50 \times 30 \times 570$ mm. Celkem bylo zkoušeno 20 ks zkušebních těles, zkoušky probíhaly v souladu s normou [111]. Schéma uspořádání zkoušky je zobrazeno na Obr. 66, uspořádání odpovídá požadavkům na uspořádání zkoušky v pevnosti v ohybu, které již byly uvedeny v kap. 4.2.1.3.



Obr. 66 Rozměry vzorku a schéma uspořádání zkoušky pro pevnost v ohybu, rozměry v mm.

Zatěžování probíhalo mechanickým lisem Heckert FPZ 100/1 konstantní rychlostí 2,5 mm/min až do porušení. Maximální síly bylo dosaženo u vzorků se zubovitým spojem průměrně po 264 s, u referenčních vzorků bez spoje průměrně po 331 s. Při zkoušení byla zjišťována maximální působící síla F_{\max} .



Obr. 67 Zkouška pevnosti za ohybu lamel spojovaných zubovitým spojem [archiv autora].

Ze zjištěné maximální působící síly F_{max} byla pevnost v ohybu $f_{m,w,j}$ stanovena podle ČSN EN 408 [111] pomocí vztahu (10). Protože nebyla zkušební tělesa klimatizována ve standardním prostředí s teplotou $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí $(65 \pm 5) \%$, pohybovala se vlhkost vzorků kolem 9,8 %. Pro srovnatelnost byly tedy výsledky přepočteny pomocí vztahu (12) tak, aby odpovídaly pevnostem vzorků s 12 % vlhkostí.

4.2.2.3 Požadavky na zubovité spoje

Zubovitý spoj musí splňovat požadavky na účinnost zubovitého spoje podle vztahu (1) uvedeném v kap. 2.3.3.3.

Pevnost zubovitého spoje musí odpovídat požadavkům normy ČSN EN 14 080 [55]. Norma v čl. 5.2.4.2 porovnává charakteristické pevnosti – charakteristickou pevnost zubovitých spojů $f_{m,j,k}$ s charakteristickou pevností v ohybu lamel v poloze na stojato:

$$f_{m,j,k} \geq k_f f_{m,l,k}, \quad (19)$$

kde $f_{m,j,k}$ je charakteristická pevnost v ohybu zubovitých spojů v N/mm^2 , k_f je součinitel uvažující směr zatížení ($k_f = 1$ pro ohyb na stojato a $k_f = 1,2$ pro ohyb na ležato) a $f_{m,l,k}$ je charakteristická pevnost v ohybu lamel v poloze na stojato v N/mm^2 .

Z textu normy však nevyplyvá, zda je polohou nastojato myšlena poloha zkušebních těles nebo orientace zubovitého spoje. Obecně by však neměla být pevnost lamely se zubovitým spojem menší než pevnost lamely bez spoje, což lze vyjádřit vztahem:

$$f_{m,j} \geq f_{m,l}, \quad (20)$$

kde $f_{m,j}$ je pevnost v ohybu zubovitých spojů (v N/mm^2) a $f_{m,l}$ je pevnost v ohybu lamel bez spoje (v N/mm^2).

Požadavky na pevnost zubovitého spoje v ohybu pro bukové lamely je uvedena v [57]. Zde jsou pro jednotlivé třídy lepených nosníků uvedeny požadované charakteristické pevnosti zubovitého spoje v ohybu (Tab. 21).

Tab. 21 Charakteristická pevnost zubovitého spoje v ohybu $f_{m,j,k}$ v N/mm^2 pro bukové lepené lamelové dřevo; h = homogenní, c = kombinované [57].

	Třída pevnosti lepeného lamelového dřeva					
	GL 28h	GL 32c	GL 36c	GL 40c	GL 44c	GL 48c
Pevnost v ohybu	≥ 47	≥ 55	≥ 58	≥ 62	≥ 65	≥ 69

4.2.2.4 Vlhkost

Vlhkost ω byla určena na všech vzorcích váhovou metodou podle normy EN 13183-1 [112]. Obsah vlhkosti byl stanoven na celých zkušebních tělesech. Vlhkost byla určena podle metodiky popsané v kap. 4.2.1.6.

4.2.2.5 Objemová hmotnost

Pro referenční zkušební tělesa (beze spoje) byla rovněž určována objemová hmotnost podle normy ČSN 49 0108 [119], a to na celých neporušených vzorcích (před provedením zkoušek).

Výsledky byly vyjádřeny podle vztahu (16) a přepočteny na hodnotu odpovídající 12% vlhkosti podle vztahu (17).

4.2.3 Experimentální ověření chování nosníků LLD

Experimenty pro ověření vlastností LLD z listnatého dřeva byly zaměřeny na chování LLD jako celku. Určována byla pevnost a modul pružnosti v čtyřbodovém ohybu na semi-scale vzorcích. Zkušební tělesa byla dvojího druhu:

- Homogenní lepené lamelové dřevo – zkušební tělesa vyrobena z bukového dřeva (ozn. BK),
- Hybridní lepené lamelové dřevo – zkušební tělesa vyrobena z bukového a topolového dřeva (ozn. HYB).

Kromě zkušebních těles byla pro srovnání vyrobena i referenční zkušební tělesa homogenní smrková (ozn. SM).

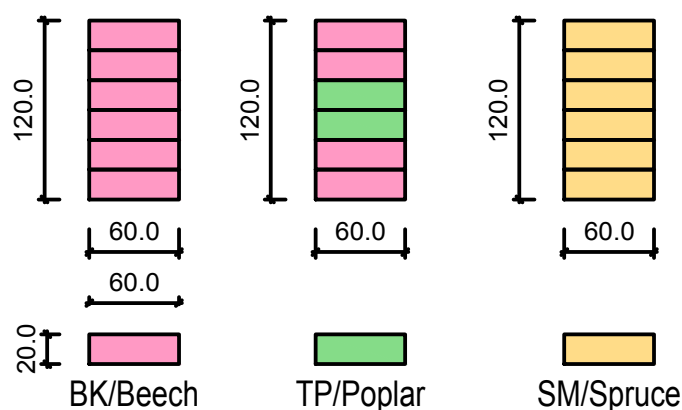
4.2.3.1 Příprava vzorků

Zkušební tělesa byla tedy vyrobena z dřeva těchto dřevin:

- Buk lesní (*Fagus sylvatica*),
- Topol (*Populus*),
- Smrk ztepilý (*Picea abies*).

Protože zaměření této části práce je na chování LLD jako celku, byly pro výrobu lepených prvků použity nespojované lamely, tj. lamely bez zubovitého spoje. Výsledky experimentu tedy nejsou ovlivněny funkcí nebo nefunkcí zubovitého spoje. Z důvodu použití nespojovaných lamel byl zvolen semi-scale rozměr vzorků (o průřezu 60 × 120 mm a délce 2,4 m), neboť ve full-scale rozměrech by nebylo možné lepené prvky bez podélného napojování lamel vyrobit (běžnému průřezu 120 × 240 mm by odpovídala délka zkušebního tělesa 4,8 m).

Zakreslení skladby zkoušených LLD nosníků je zobrazeno na Obr. 68.



Obr. 68 Zkoušené vzorky LLD; BK = buk, TP = topol, SM = smrk.

Výroba zkušebních těles byla zajištěna dodavatelem Roman Million Wood s.r.o., Moravská Třebová, Linhartice, který se zaměřuje na výrobu KVH hranolů, DUO/TRIO hranolů a LLD hranolů ze smrkového dřeva, a to až do rozměru $200 \times 1200 \times 13\,500$ mm [121].

Celkem bylo vyrobeno 24 ks zkušebních těles o rozměru $60 \times 120 \times 2400$ mm, každé zkušební těleso bylo tvořeno 6 lamelami výšky 20 mm (Obr. 68). Počet těles podle druhu LLD byl rozdělen takto:

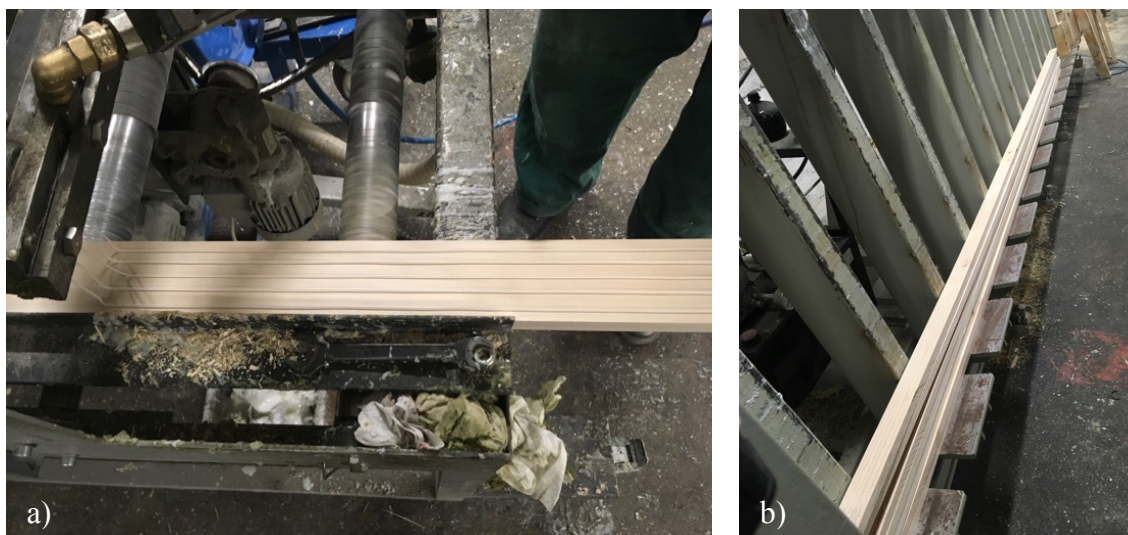
- Homogenní bukové LLD: 6 ks,
- Hybridní LLD buk – topol: 12 ks,
- Homogenní smrkové LLD: 6 ks.

Pro zkoušky dřeva pro stanovení charakteristické hodnoty je podle ČSN EN 384 [110] požadováno minimálně 40 vzorků. Toto množství nebylo možné z důvodu výroby zajistit, ale protože se nejedná o stanovení charakteristické hodnoty, ale pouze o experiment pro ověření vlastností nového výrobku, je vyrobené množství pro tento účel dostačující.

Lepení LLD

Pro lepení lamel LLD bylo použito PUR lepidlo Casco Adhesives Polyuretane systém 2010 švédského výrobce AkzoNobel [122]. Jedná se o jedno komponentní lepidlo určené pro lepení dřevěných nosných hranolů, pro výrobu lepených lamelových nosníků, lepení zubovitých spojů, duo a trio hranolů a lepení konstrukčních prvků, jako je křížem lepené lamelové dřevo (CLT), vždy s požadavkem na vysokou odolnost vůči vodě a povětrnostním podmínkám.

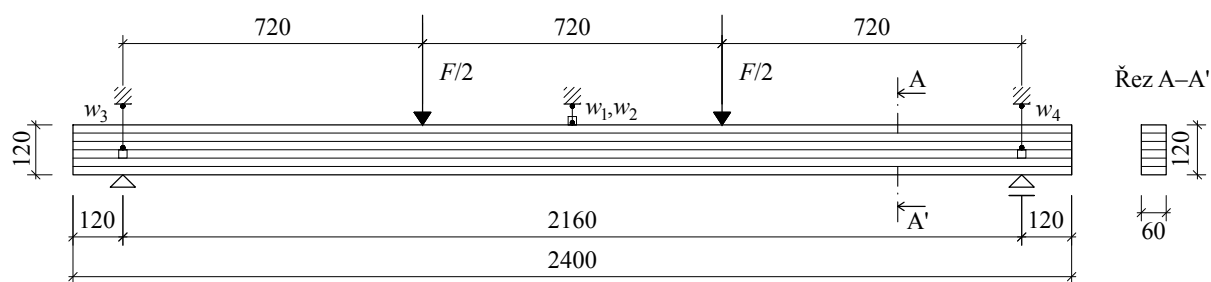
Lepidlo bylo nanášeno strojově v množství přibližně $180\text{--}200\text{ g/m}^2$, otevřený čas byl 10–15 min. Lisovací tlak byl 10 N/mm^2 a čas lisování 120 min (kvůli nedostatku zkušeností s kombinací zvoleného lepidla a dřeviny byl delší lisovací čas zvolen na stranu bezpečnou; lisovací čas požadovaný normou [55] je v řádech sekund). Fotografie z výroby zkušebních vzorků jsou uvedeny na Obr. 69.



Obr. 69 Výroba LLD (a) nanášení lepidla, (b) seskládání nosníku v lisu [archiv autora].

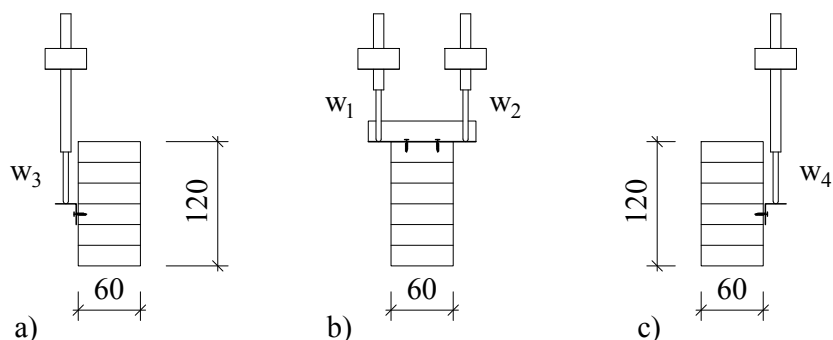
4.2.3.2 Zkoušky pevnosti a modulu pružnosti LLD ve čtyřbodovém ohybu

Pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu byly experimentálně určovány v souladu s normou ČSN EN 408 [111]. Schéma uspořádání zkoušky je zobrazeno na Obr. 70, uspořádání odpovídá požadavkům na uspořádání zkoušky v pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu, které již byly uvedeny v kap. 4.2.1.3.



Obr. 70 Geometrie zkoušky LLD ve čtyřbodovém ohybu, rozměry v mm.

Pro snímání deformace w byly nosníky osazeny indukčními snímači dráhy Ld HBM na ocelové L profily, které byly připevněny k nosníkům pomocí vrtů, a to v místech podpor a uprostřed rozpětí. Osazení snímačů je zobrazeno na Obr. 71.



Obr. 71 Osazení snímačů dráhy na zkušební těleso; poloha řezů odpovídající Obr. 70: a) u levé podpory, b) ve středu rozpětí, c) u pravé podpory, rozměry v mm.

Zatěžování probíhalo pomocí elektrohydraulického zatěžovacího systému INOVA na lámací dráze AdMaS konstantní rychlostí 3,6 mm/min až do porušení. Rychlost zatěžování odpovídá požadavku normy [111] na maximální (0,003h) mm/s, což při rozměru vzorků odpovídá 21,6 mm/min. Průměrná doba dosažení maximální síly F_{\max} byla u homogenních bukových nosníků 313 s, hybridních bukově-topolových nosníků 395 s a homogenních smrkových nosníků průměrně 199 s. Doba dosažení maximální síly odpovídala pro všechna tělesa požadavku normy [111] na (300 ± 120) s. Tělesa byla zatěžována až do porušení. V průběhu zkoušky bylo zaznamenáno zatížení F v N, deformace w v mm a čas t v s.



Obr. 72 Zkouška zkušebního tělesa LLD ve čtyřbodovém ohybu [archiv autora].

Ze zjištěné maximální působící síly F_{\max} byla pevnost v ohybu $f_{m,w,j}$ stanovena podle ČSN EN 408 [111] pomocí vztahu (10). Protože nebyla zkušební tělesa klimatizována ve standardním prostředí s teplotou (20 ± 2) °C a relativní vlhkostí (65 ± 5) %, pohybovala se

vlhkost vzorků kolem 8 %. Pro srovnatelnost byly tedy výsledky přepočteny tak, aby odpovídaly pevnostem vzorků s 12% vlhkostí, pomocí vztahu (12). Modul pružnosti v ohybu byl určen postupem popsaným v kap. 4.2.1.3 pomocí vztahu (11). Deformace w byla z hodnot získaných čtyřmi snímači vyhodnocena jako průměrný svislý posun snímačů ve středu rozpětí w_1 a w_2 , od kterého byl odečten průměrný svislý posun nad podporami ze snímačů w_3 a w_4 . Výsledná deformace w tedy byla vypočítána podle vztahu:

$$w = \frac{w_1 + w_2}{2} - \frac{w_3 + w_4}{2}, \quad (21)$$

kde w_1 a w_2 je svislý posun snímačů ve středu rozpětí, w_3 a w_4 svislý posun snímačů nad podporami (Obr. 71).

Získané hodnoty modulu pružnosti byly přepočteny na hodnoty odpovídající 12% vlhkosti podle vztahu (13).

4.2.3.3 Vlhkost LLD

Vlhkost byla určena na odřezcích zkušebních těles, které vznikly při délkové úpravě vzorků ke zkoušce pevnosti a modulu pružnosti v ohybu. Rozměry průřezu 60×120 mm tedy odpovídaly průřezu LLD, délka vzorku byla v průměru 180 mm. Vlhkost byla určena váhovou metodou podle normy EN 13183-1 [112], metodika je popsána v kap. 4.2.1.6.

4.2.3.4 Objemová hmotnost LLD

Pro každé zkušební těleso – LLD nosník – byla rovněž určována objemová hmotnost podle normy ČSN 49 0108 [119], a to na celých neporušených vzorcích (před provedením zkoušek).

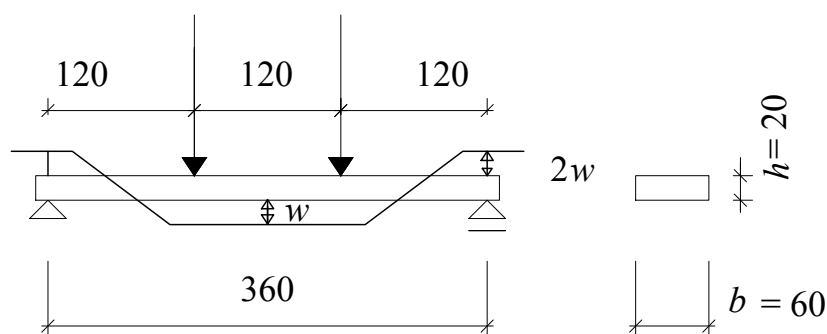
Výsledky byly vyjádřeny podle vztahu (16) a přepočítány na hodnotu odpovídající 12% vlhkosti podle vztahu (17).

4.2.3.5 Zkoušky pevnosti a modulu pružnosti lamel ve čtyřbodovém ohybu

Zkoušky pevnosti a modulu pružnosti jednotlivých lamel byly provedeny pro zjištění mechanických vlastností dřeva, ze kterého byly nosníky LLD vyrobeny. Zkoušky byly provedeny na zbytku lamel, které nebyly na výrobu LLD použity, čemuž odpovídá i počet jednotlivých kusů zkoušených vzorků. Ke zkouškám byly vybrány lamely bez suků a vad.

Zkoušeno bylo celkem 49 vzorků, z toho 9 ks lamel bukových, 20 ks topolových a 20 ks smrkových lamel.

Pevnost a modul pružnosti lamel v ohybu byly experimentálně určovány v souladu s normou ČSN EN 408 [111], vzorky byly upraveny na velikost $60 \times 20 \times 380$ mm. Schéma uspořádání zkoušky je zobrazeno na Obr. 73, uspořádání odpovídá požadavkům na uspořádání zkoušky v pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu, které již byly uvedeny v kap. 4.2.1.3.



Obr. 73 Uspořádání zkoušky pevnosti a modulu pružnosti v ohybu lamel, rozměry v mm.

Zatěžování probíhalo za pomoci mechanického lisu Heckert FPZ 100/1. Rychlost zatěžování byla konstantní a byla zvolena pro smrkové dřevo 1,9 mm/min, pro topolové 2,5 mm/min a pro bukové 4 mm/min. Všechny tyto rychlosti odpovídají požadavku normy [111] na maximální $(0,003h)$ mm/s, což při rozměru vzorků odpovídá 3,6 mm/min. Doba dosažení maximální síly F_{\max} byla u smrkových lamel průměrně 259 s, u topolových lamel 299 s a u bukových 289 s. Doba dosažení maximální síly odpovídala pro všechna tělesa požadavku normy [111] na (300 ± 120) s. Tělesa byla zatěžována až do porušení.

Deformace w byla snímána pomocí zkušebního přípravku zapůjčeného pro účely zkoušení doc. Ing. Pavlem Schmidem, Ph.D. z Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební VUT v Brně. Při zatěžování vzorku byl přípravek ke zkušebnímu tělesu přiložen nad jednou podporou a uprostřed rozpětí, nad druhou podporou byl umístěn snímač dráhy Ld HBM Typ WA/100 mm, který měřil dvojnásobný svislý posun oproti posunu uprostřed rozpětí (Obr. 73).

V průběhu zkoušky bylo zaznamenáno zatížení F v N, deformace w v mm a čas t v s.

Ze zjištěné maximální působící síly F_{\max} byla pevnost v ohybu $f_{m,w,j}$ stanovena podle ČSN EN 408 [111] pomocí vztahu (10), výsledky byly přepočteny na 12% vlhkost. Modul pružnosti v ohybu byl určen postupem popsáním v kap. 4.2.1.3 a rovněž přepočítán na hodnoty odpovídající 12% vlhkosti.

4.2.3.6 Objemová hmotnost lamel

Byla rovněž určena vlhkost a objemová hmotnost dřeva lamel podle normy ČSN 49 0108 [119], a to na celých neporušených vzorcích (před provedením zkoušek),

Výsledky byly vyjádřeny podle vztahu (16) a přepočítány na hodnotu odpovídající 12% vlhkosti podle vztahu (17).

4.2.3.7 Vlhkost lamel

Vlhkost byla určena na celých lamelách váhovou metodou podle normy EN 13183-1 [112], metodika je popsána v kap. 4.2.1.6.

4.3 Komparativní metody

Po komplexní teoretické a experimentální analýze u sledované problematiky bylo provedeno porovnání dílčích experimentů provedených v laboratořích s hodnotami v dostupné odborné literatuře.

5 VÝSLEDKY DISERTAČNÍ PRÁCE

Na základě stanovených cílů disertační práce bylo dosaženo následujících výsledků, které jsou dále rozčleněny podle návaznosti jednotlivých částí.

5.1 Vymezení oblasti klimatolerantních dřevin aplikovatelných v konstrukcích pozemních staveb

První z cílů disertační práce bylo vymezit, co jsou to klimatolerantní dřeviny, a které dřeviny z tohoto souboru mají předpoklady pro to, aby byly použitelné v konstrukcích pozemních staveb.

Při naplňování tohoto cíle se vycházelo z dostupné odborné literatury. Klimatolerantními dřevinami jsou myšleny dřeviny, které:

- se vyskytují v přirozené skladbě lesa ČR – tedy je předpoklad, že jejich pěstování bude dlouhodobě udržitelné,
- mají významný podíl v zastoupení v doporučené skladbě lesa ČR – tedy je předpoklad, že tohoto dřeva bude dostatek a tomu bude v budoucnu odpovídat i cena této suroviny.

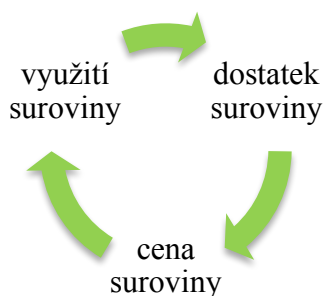
V přirozené skladbě lesa (viz Tab. 2) mají největší podíl porostní plochy buk (40,2 %), dub a jedle. V doporučené skladbě lesa [5] má vzhledem k jeho současné využitelnosti největší podíl porostní plochy smrk (36,5 %), buk (18 %) a borovice (16,8 %). Doporučená skladba lesa je však kompromisem zohledňujícím právě požadavky dřevozpracujícího průmyslu, které vycházejí z dlouhodobého využívání smrkové suroviny na celou řadu aplikací. Masové využívání smrkového dřeva má zřejmě tyto hlavní důvody:

- velké porostní plochy smrku: smrkového dřeva je (nebo doposud byl) dostatek (plošné vysazování smrku však započalo z důvodu jeho využívání jako paliva);
- smrk patří mezi rychle rostoucí dřeviny, což opět zajišťuje jeho dostatek;
- dostatek smrku se odráží na jeho nízké ceně;
- smrk má rovný dlouhý kmen, což je vhodné pro zpracování (malý odpad materiálu);
- smrkové dřevo se dobře opracovává a lepí;
- smrkové dřevo je relativně lehké, a proto se s ním poměrně dobře manipuluje na stavbě.

Používání smrkového dřeva má však také své nevýhody, zejména:

- pěstování smrkového dřeva není v našich klimatických podmínkách dlouhodobě udržitelné (což dokazuje probíhající kůrovcová kalamita, velké množství smrků však schne i z důvodu velmi suchého a teplého počasí, s čímž se tato dřevina nedokáže úplně vyrovnat),
- mechanické vlastnosti smrkového dřeva se zhoršují; je to dáno pěstováním na příliš výživných stanovištích (smrk je druh přirozeně rostoucí přibližně ve výškách 900–1400 m n. m. – viz Obr. 3 na str. 13), a tedy rychlejším růstem, přičemž narůstá jarní zóna dřeva při víceméně konstantní šířce zóny dřeva letního a poměr mechanicky odolnějšího letního dřeva s vyšší hustotou se tak snižuje,
- zhoršování mechanických vlastností povede k nutnosti návrhu robustnějších prvků, přičemž mechanické vlastnosti smrku jsou oproti jiným zmíněným (listnatým) dřevinám, jako je buk nebo dub, již nyní výrazně nižší (porovnání je provedeno v kap. 5.2), což způsobí vyšší nároky jednak na dopravu, ale i na prostor (vyšší výška stropu kvůli nutné vyšší výšce stropních prvků apod.),
- ztráty smrkové suroviny z důvodu kalamit (způsobených tím, že smrky nejsou v pro ně nevyhovujících pěstebních podmínkách dostatečně odolné) způsobí ve velmi blízké budoucnosti nedostatek této suroviny, zejména ve vyšších jakostních třídách,
- snížení množství smrkové suroviny bude mít za následek růst její ceny.

Využití dřevní suroviny má přímou souvislost s jejím dostatkem, který ovlivňuje i cenu. Pokud je suroviny dostatek, je její cena nízká, surovina se využívá a klade požadavky na to, aby byl této suroviny stále dostatek. Tato závislost je znázorněna v diagramu na Obr. 74.



Obr. 74 Závislost mezi dostatkem, cenou a využitím suroviny.

Popsaný mechanismus bude brzy u smrkové suroviny fungovat opačným směrem, tedy nedostatek suroviny způsobí růst její ceny, a tím sníží využití této suroviny. Proto, i když je ve velké míře v doporučené skladbě lesa smrk zastoupen, nelze ho považovat za klimatolerantní dřevinu.

U ostatních dřevin, jichž bude naopak podle Tab. 2 ve skladbě lesa přibývat, lze naopak očekávat snížení ceny suroviny a následně větší poptávkou po jejím využití. Jedná se zejména o buk (*Fagus sylvatica*), dub (*Quercus*), lípu (*Tilia*), javor (*Acer*) a habr (*Carpinus betulus*).

Z výběru je třeba vyřadit lípu (*Tilia cordata*), jejíž porostní plocha v doporučené skladbě lesa není zanedbatelná, jedná se však často spíše o meliorující dřevinu, kdy kvalitní sortimenty jsou spíše druhořadé. Lipové dřevo je měkké a křehké a není proto pro konstrukční účely vhodné (viz kap. 2.2.2).

5.2 Vybrané vlastnosti klimatolerantních dřevin

Vybrané vlastnosti jednotlivých druhů byly stanoveny pomocí experimentu a následně bylo provedeno porovnání dřevin v rámci souboru vybraných listnatých dřevin a se smrkem jako referenční dřevinou.

Vlastnosti dřevin důležité pro použití v konstrukcích pozemních staveb lze rozdělit na vlastnosti fyzikální a mechanické. Z fyzikálních vlastností lze za nejdůležitější z hlediska návrhu a provádění konstrukcí staveb považovat:

- objemovou hmotnost – souvislost s mechanickými vlastnostmi a odolností dřeva, ale taky s dopravou a manipulací prvků na stavbě, možnost použití efektivních spojovacích prvků;
- tvrdost a s ní související opracovatelnost – souvislost se zpracováním suroviny i opracováním přímo na stavbě, spojovatelností spojovacími prvky atd.,
- sesychání – souvisí s rozměrovou stabilitou a případným vznikem povrchových trhlin, v souvislosti s lepením rovněž se stabilitou lepené spáry a případnou delaminací působením měnící se vlhkosti prostředí.

Z mechanických vlastností lze za nejdůležitější z hlediska návrhu a provádění konstrukcí pozemních staveb považovat pevnostní charakteristiky a moduly pružnosti při nejčastějším namáhání prvků v konstrukci:

- pevnost (v ohybu, ve smyku) a modul pružnosti v ohybu a ve smyku – odpovídá použití prvků pro stropní a střešní konstrukce, průvlaky a další prvky,
- pevnost v tlaku – odpovídá použití prvků pro sloupy nebo stěnové sloupkové konstrukce.

Fyzikální a mechanické vlastnosti klimatolerantních dřevin, které uvádí odborná literatura, jsou podrobně popsány v kap. 2.2.2.

Experimentálně byly určovány vlastnosti popsané v kap. 4.2.1.2 a to na vzorcích dřevin popsaných v kap. 4.2.1.1. Hodnoty dalších vlastností byly převzaty z odborné literatury. Experimenty popsané v této kapitole budou dále v textu označeny č. 1, přičemž jednotlivé podexperimenty budou značeny písmeny.

5.2.1 Objemová hmotnost (experiment 1A)

Objemová hmotnost byla pro vzorky dřeviny experimentálně určena podle metodiky popsané v kap. 4.2.1.5.

Nejnižší objemová hmotnost ze zkoumaných dřevin byla zjištěna u javoru s hodnotou 616 kg/m^3 , nejvyšší u habru s hodnotou 734 kg/m^3 , vždy při 12% vlhkosti (Tab. 22). Hodnoty pro 0% vlhkost byly určeny z vysušených vzorků. V Tab. 22 je uvedeno srovnání experimentálně zjištěných hodnot s hodnotami dostupnými v odborné literatuře. Z literatury [33] byly do srovnání vybrány nejbližší příbuzné druhy: ^{*1}buk velkolistý (*Fagus grandifolia*), ^{*2}dub červený (*Quercus rubra*), ^{*3}javor velkolistý (*Acer Macrophyllum*). Je rovněž provedeno srovnání s objemovou hmotností smrku převzatou z literatury.

Tab. 22 Objemová hmotnost – srovnání výsledků experimentu 1A s odbornou literaturou a se smrkem.

objemová hmotnost ρ v kg/m^3	buk	dub	habr	javor	smrk
Experiment 1A:					
pro $\omega = 12 \%$	682	687	734	616	–
pro $\omega = 0 \%$	620	624	667	556	–
Literatura:					
podle [9] – pro $\omega = 0 \%$	684	696	697	526	392
podle [28] – pro $\omega = 0 \%$	680	650	790	620	430
podle [33] – pro $\omega = 12 \%$	640 ^{*1}	610 ^{*2}	–	480 ^{*3}	440

Objemová hmotnost buku, topolu a smrku byla dále zjišťována i při dalších experimentálních měřeních.

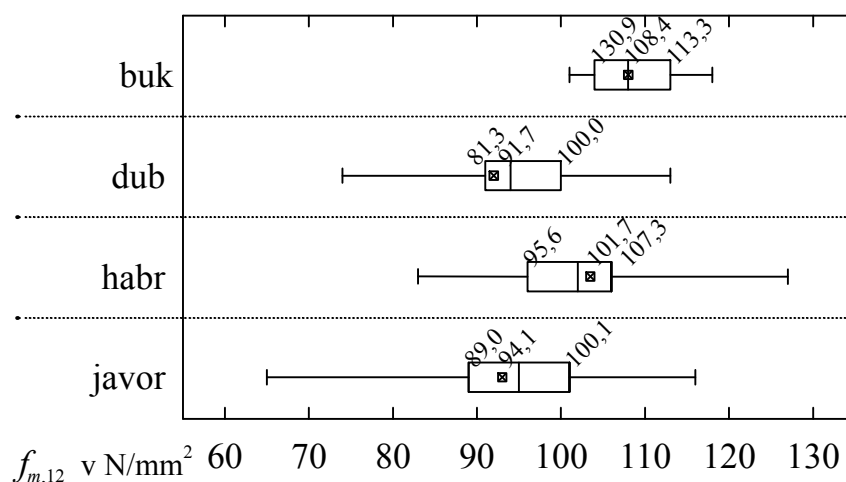
Objemová hmotnost buku zjištěná experimentem 1A byla nižší, než udává literatura [9] i [28]. Ve srovnání s dubem byla podle experimentu téměř srovnatelná, zatímco podle [9] je objemová hmotnost dubu o 2 % vyšší než objemová hmotnost buku. Podle [28] je objemová hmotnost dubu o 4 % nižší než objemová hmotnost buku. Každá literatura udává hodnoty objemové hmotnosti pro jinou vlhkost (např. jen pro $\omega = 0 \%$) a protože přepočít na stejnou vlhkost podle vztahu (17) lze použít jen pro omezený rozsah vlhkosti, nelze objemovou vlhkost dřevin udávanou v odborné literatuře pro jednotlivé dřeviny zcela vždy srovnat.

Pokud se vyjádří výsledky vzhledem k objemové hmotnosti smrku, pak podle [9] je objemová hmotnost buku o 74 % vyšší, dubu a habru o 78 % vyšší a javoru o 34 % vyšší. Podle [28] je objemová hmotnost buku o 58 %, dubu o 51 % a habru o 84 % vyšší než objemová hmotnost smrku.

5.2.2 Pevnost v ohybu (experiment 1B)

Pevnost v ohybu byla zjišťována podle metodiky popsané v kap. 4.2.1.3, postup vyhodnocení výsledků je rovněž v této kapitole popsán.

Výsledky zkoušek lze vyjádřit krabicovým grafem, který zobrazuje soubor dat pomocí jejich kvartilů. Křabicová část grafu je ohraničena 1. (25 %) a 3. (75 %) kvartilem, linie mezi nimi zobrazuje medián, křížkem je označen aritmetický průměr. Linie, které vycházejí ze střední části diagramu, vyjadřují variabilitu dat pod prvním a nad třetím kvartilem. Hodnoty minima (0 %) a maxima (100 %) jsou zobrazeny krátkými čarami na konci těchto linií. Křabicový graf pro zkoušku pevnosti v ohybu je zobrazen na Obr. 75.



Obr. 75 Hodnoty testování pevnosti ve čtyřbodovém ohybu (experiment 1B) vyjádřené pomocí krabicového grafu.

Podle výsledků provedených zkoušek (experiment 1B) byl jako dřevina s největší pevností v ohybu vyhodnocen buk s hodnotou 108,4 N/mm², nejnižších hodnot z uvedeného souboru dřevin dosáhlo dřevo dubu, a to 91,7 N/mm². Výsledné hodnoty zjišťované pevnosti v ohybu jsou shrnuty v Tab. 23, kde je rovněž uvedeno srovnání experimentálně zjištěných hodnot s hodnotami dostupnými v odborné literatuře. Z literatury [33] byly do srovnání vybrány nejbližší příbuzné druhy: ^{*1}buk velkolistý (*Fagus grandifolia*), ^{*2}dub červený (*Quercus rubra*), ^{*3}javor velkolistý (*Acer Macrophyllum*). Je rovněž provedeno srovnání s objemovou hmotností

smrku převzatou z literatury. Hodnoty podle [28] byly přepočteny z hodnoty pro 15% vlhkost podle vztahu (12).

Tab. 23 Pevnost v ohybu klimatolerantních dřevin – srovnání výsledků experimentu s odbornou literaturou a se smrkem.

$f_{m,12}$ v N/mm ²	buk	dub	habr	javor	smrk
Experiment 1B:					
průměr \bar{x}	108,4	91,7	101,7	94,1	–
medián \tilde{x}	107,8	93,9	103,7	96,5	–
směrodatná odchylka s	5,06	10,50	21,41	11,64	–
Literatura:					
podle [9]	124	85,2	130,7	114	R 70,4 T 72,9
podle [28]	115	97	143	129	57,1
Podle [108]	123	110	–	–	78
podle [33]	103 ^{*1}	96 ^{*2}	–	74 ^{*3}	72,0

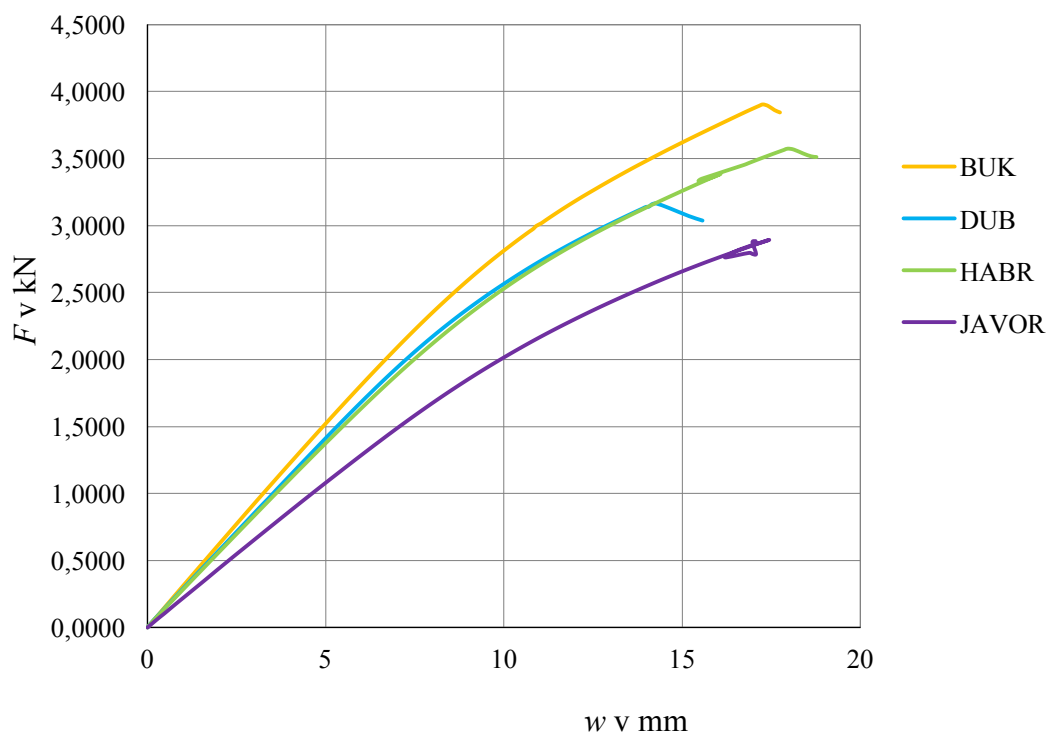
Experiment 1B potvrdil, že buk má vyšší pevnost v ohybu než dub, jak je uvedeno v odborné literatuře [9], [28], [33], [108], i když konkrétní hodnoty pevnosti v tlaku bukového dřeva se napříč literaturou mírně liší, pohybují se mezi 103–124 N/mm². Nejvyšší pevnost podle experimentu (Tab. 23) i podle odborné literatury vykazuje dřevo habru, u kterého se hodnoty pevnosti v ohybu pohybují v literatuře [9], [28] mezi 130,7–143 N/mm². Výsledky experimentu byly opět nižší než hodnoty v literatuře, a dosáhly pro buk hodnoty 108,7 N/mm². Dub dosahuje podle experimentu i podle literatury nejnižších hodnot pevnosti v ohybu ze všech hodnocených listnatých dřevin.

Při srovnání s pevností v ohybu dřeva smrkového dosahuje podle [9] buk více než o 70 % větší hodnoty, dub o 20 %, habr o 84 % a javor o 60 % větší pevnosti v ohybu než smrk.

5.2.3 Modul pružnosti v ohybu (experiment 1C)

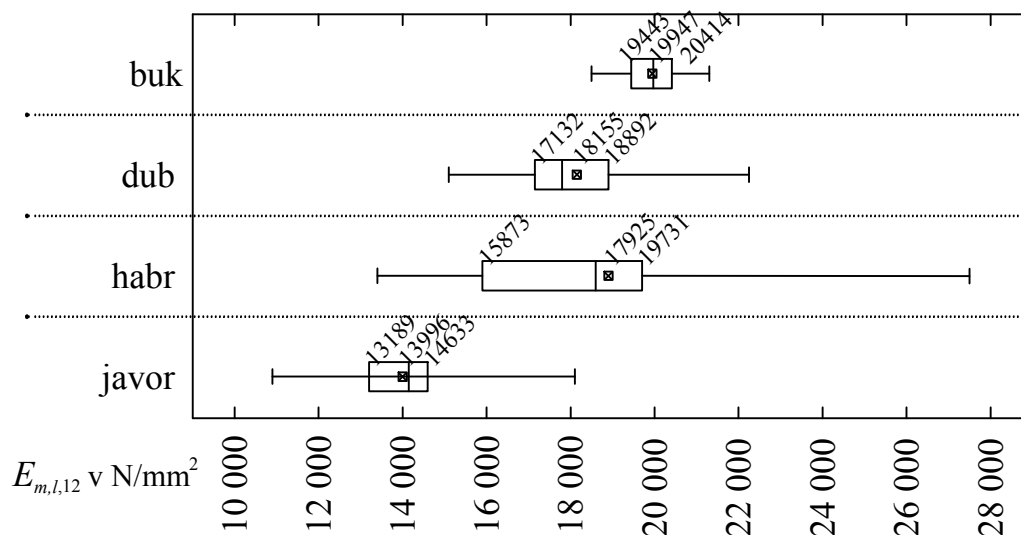
Modul pružnosti v ohybu byl zjišťován podle metodiky popsané v kap. 4.2.1.3 a vyhodnocen postupem uvedeným v téže kapitole.

Pro srovnání chování zkoušených dřevin, tj. buku, dubu, habru a javoru, při namáhání ve čtyřbodovém ohybu byly průměrné hodnoty všech naměřených hodnot pro každou dřevinu srovnány v grafu na Obr. 76.



Obr. 76 Srovnání chování jednotlivých klimatolerantních dřevin.

Krabicový graf pro hodnoty experimentálně zjištěných modulů pružnosti klimatolerantních dřevin $E_{m,l,12}$ je vyneseno na Obr. 77.



Obr. 77 Experiment 1C hodnoty testování modulu pružnosti ve čtyřbodovém ohybu vyjádřené pomocí krabicového grafu.

Nejvyšší hodnota modulu pružnosti byla zjištěna u buku s hodnotou 19 947 N/mm², nejnižší u javoru s hodnotou 13 996 N/mm². Výsledné hodnoty zjišťované pevnosti v ohybu jsou shrnuty v Tab. 24, kde jsou experimentálně určené hodnoty modulu pružnosti v ohybu zkoušených

dřevin srovnány s hodnotami dostupnými v odborné literatuře a se smrkem. Hodnoty podle [28] byly přepočteny z hodnoty pro 15% vlhkost podle vztahu (13).

Tab. 24 Srovnání modulu pružnosti v ohybu klimatolerantních dřevin určené experimentem a uvedené v literatuře a se smrkem.

$E_{m,l,12}$ v N/mm ²	buk	dub	habr	javor	smrk
experiment 1C:					
průměr \bar{x}	19 947	18155	17925	13996	–
medián \tilde{x}	19 968	17821	17573	14134	–
směrodatná odchylka s	730	1549	2782	1563	–
literatura:					
podle [9] pro $\omega = 10\text{--}12\%$	12 966	–	13 417	9 582	8948
podle [28]	16 495	12 100	16 700	11 650	–
podle [108]	16 000	13 000	–	–	–
podle [33]	11900 ^{*1}	11300 ^{*2}	–	10000 ^{*3}	8500

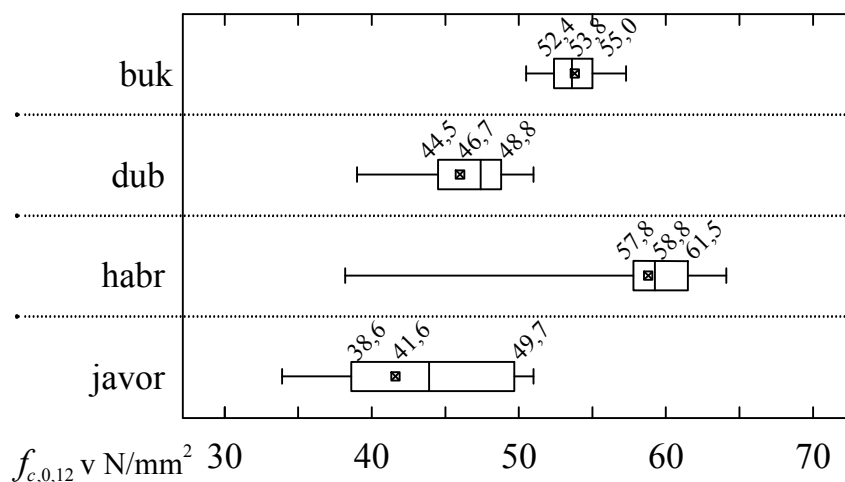
Ze srovnání je zřejmé, že i modul pružnosti v ohybu $E_{m,l,12}$ buku je větší než modul pružnosti v ohybu dubu, toto zjištění je shodné podle výsledků experimentu i podle odborné literatury, podle nichž má buk nejvyšší modul pružnosti ze všech hodnocených dřevin. Experimentem určené moduly pružnosti všech hodnocených dřevin jsou vyšší než hodnoty, které jsou uvedeny v odborné literatuře.

Modul pružnosti v ohybu $E_{m,l,12}$ dubu je nižší než modul pružnosti v ohybu buku, ale podle experimentu vyšší než modul pružnosti habru. Naopak literatura [28] uvádí, že modul pružnosti habru je vyšší než modul pružnosti dubu a mírně vyšší, ale stále srovnatelný s modulem pružnosti buku.

Při srovnání se smrkem je zřejmé, že buk má přibližně o 125 % větší modul pružnosti než smrk.

5.2.4 Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny (experiment 1D)

Pevnost v tlaku byla zjišťována a vyhodnocena podle metodiky popsané v kap. 4.2.1.4. Krabicový graf pro hodnoty experimentálně zjištěných pevností v tlaku klimatolerantních dřevin je vynesena na Obr. 78.



Obr. 78 Hodnoty testování pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny vyjádřené pomocí krabicového grafu.

Nejvyšší pevnosti v tlaku $f_{c,0,12}$ dosahovalo dřevo habrové s hodnotou $58,8 \text{ N/mm}^2$, zatímco jako dřevo s nejnižší pevností v tlaku bylo vyhodnoceno dřevo javorové s hodnotou $41,6 \text{ N/mm}^2$. Hodnoty získané při zkoušce pevnosti ve směru vláken a jejich srovnání s hodnotami v odborné literatuře je uvedeno v Tab. 25. Hodnoty podle [28] byly přepočteny z hodnoty pro 15% vlhkost dle vztahu (15).

Tab. 25 Srovnání pevností v tlaku klimatolerantních dřevin ve směru vláken experimentálně určené a se smrkem.

$f_{c,0,12}$, v N/mm^2	buk	dub	habr	javor	smrk
Experiment 1D:					
průměr \bar{x}	53,8	46,7	58,8	41,6	–
medián \tilde{x}	53,6	47,4	59,3	43,9	–
směrodatná odchylka s	1,93	2,88	4,53	5,45	–
Literatura:					
podle [9]	56,7	59,8	62,5	59	34,1
podle [28]	58	57	73	58	33
Podle [108]	62	65	–	–	50
podle [33]	50,3 ^{*1}	45 ^{*2}	–	41 ^{*3}	39

Ze srovnání je zřejmé, že hodnoty pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny získané experimentem 1D přibližně odpovídají hodnotám uváděných v odborné literatuře. Nejvyšší pevnost v tlaku vykazuje habr s hodnotou dle experimentu $58,8 \text{ N/mm}^2$, podle až literatury $62,5\text{--}73 \text{ N/mm}^2$. Druhou nejvyšší pevnost v tlaku pak vykazoval buk s experimentálně získanou hodnotou $53,8 \text{ N/mm}^2$ a hodnotami v literatuře pohybující se v rozmezí $50,3\text{--}62 \text{ N/mm}^2$.

Smrk dosahuje přibližně polovičních hodnot pevnosti v tlaku habru a buku.

5.2.5 Výskyt suků a rovnoláknitost

Výskyt suků a rovnoláknitost je dalším důležitým kritériem, neboť se od něj odvíjí výnosnost použitelného materiálu z vytěžené kulatiny. Toto kritérium bylo hodnoceno kvalitativně, podle počtu výskytu suků a průběhu vláken v celém souboru vzorků pro zkoušení pevnosti v ohybu a pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny. Pro hodnocení byla stanovena subjektivní stupnice 1 (rovnoláknité dřevo, nízký výskyt suků) – 10 (vlákna se kroutí a přetáčejí, vysoký výskyt suků). Přehled hodnot přidělených jednotlivým dřevinám je uveden v Tab. 26.

Tab. 26 Srovnání výskytu suků a rovnoláknitosti jednotlivých dřevin.

	buk	dub	habr	javor	smrk
Výskyt suků, rovnoláknitost	1	6	9	4	–

Bukové vzorky měly pravidelná rovnoběžná vlákna, výskyt suků byl minimální, proto bylo toto dřevo hodnoceno hodnotou 1. Vzorky javoru vykazovaly vyšší výskyt suků a mírné přetáčení vláken po délce vzorku, proto bylo dřevo javoru hodnoceno hodnotou 4. Vzorky dubu měly větší výskyt suků než vzorky bukové a javorové, vlákna se mírně přetáčela, proto bylo dřevo dubu hodnoceno číslem 6. Ze všech hodnocených dřevin byl největší výskyt suků u habru, jehož vlákna po délce vzorku i několikrát měnila směr, proto bylo dřevo habru hodnoceno hodnotou 9.

5.3 Vyhodnocení nejvhodnější dřeviny (nejvhodnějších dřevin) pro použití v nosných konstrukcích pozemních staveb

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že žádná z uvedených dřevin nemá významně lepší vlastnosti než ostatní ve všech zvolených kategoriích. Naopak dřeviny, které mají některé vlastnosti výrazně lepší než ostatní dřeviny, jsou v jiných vlastnostech oproti ostatním dřevinám horší. Hodnocením takových složitých situací, které mají velké množství kritérií se zabývá matematický nástroj – multikriteriální analýza.

5.3.1 Shrnutí porovnávaných vlastností

Varianty, tedy dřeviny, které vstupují do multikriteriálního hodnocení a zdůvodnění jejich výběru bylo popsáno v kap. 4.1.2.2. Jedná se o a_1 – buk obecný (*Fagus sylvatica*), a_2 – dub letní (*Quercus robur*), a_3 – habr obecný (*Carpinus betulus*) a a_4 – javor mlč (*Acer platanoides*).

Kritéria hodnocení byla popsána v kap. 4.1.2.2. Vstupní hodnoty odpovídají výsledkům jednotlivých experimentů, případně hodnotám uvedeným v literatuře následovně:

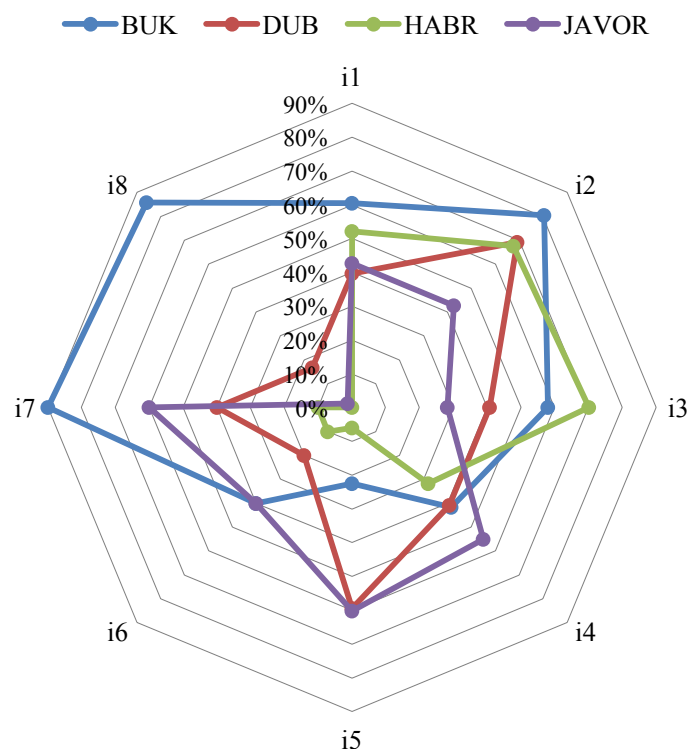
- kritérium 1: pevnost v ohybu – výsledky experimentu 1B, hodnoty uvedeny v Tab. 23,
- kritérium 2: modul pružnosti v ohybu – výsledky experimentu 1C, hodnoty uvedeny v Tab. 24,
- kritérium 3: pevnost v tlaku – výsledky experimentu 1D, hodnoty uvedeny v Tab. 25,
- kritérium 4: objemová hmotnost – výsledky experimentu 1A, hodnoty uvedeny v Tab. 22,
- kritérium 5: sesychání objemové – převzato z literatury [28], hodnoty jsou uvedeny v Tab. 14,
- kritérium 6: opracovatelnost – převzato z literatury [16], hodnoty jsou uvedeny v Tab. 13,
- kritérium 7: výskyt suků, rovnovláknitost – viz kap. 5.2.5, hodnoty uvedeny v Tab. 26.

Všechny vstupní hodnoty pro hodnocení byly shrnuty do Tab. 27, kde i je číslo kritéria, a_1 – a_4 jsou hodnocené varianty, min značí minimalizační kritérium, max kritérium maximalizační.

Tab. 27 Vstupní hodnoty multikritériální analýzy.

i	kritérium		typ	a_1 buk	a_2 dub	a_3 habr	a_4 javor
1	pevnost v ohybu	N/mm ²	max	108,4	91,7	101,7	94,1
2	modul pružnosti v ohybu	N/mm ²	max	19 947	18 155	17 925	13 996
3	pevnost v tlaku	N/mm ²	max	53,8	46,7	58,8	41,6
4	objemová hmotnost	kg/m ³	min	620	624	667	556
5	sesychání objemové	%	min	17,5	12,6	19,7	12,5
6	opracovatelnost	–	min	6	8	9	6
7	výskyt suků, rovnovláknitost	–	min	1	6	9	4
8	zvětšení porostní plochy	%	max	10,3	2,0	0	0,2

Zjednodušeně lze jednotlivé varianty (dřeviny) porovnat pomocí tzv. paprskového grafu, který vykresluje hodnoty každého kritéria na samostatné ose. Pro vynesení na osy byly jednotlivé hodnoty přepočítány na procenta, kde 0 % značí nejhorší a 100 % nejlepší hodnotu. Nejvýhodnější varianta se potom zobrazuje jako ta, která zaujímá největší plochu.



Obr. 79 Zjednodušené porovnání variant pomocí paprskového grafu.

V grafu na Obr. 79 je plocha buku 34,5 %, dubu 14,9 %, habru 12,4 %, javoru 14,6 %, lze tedy říci, že na základě zvolených kritérií je nejvýhodnější pro konstrukce pozemních staveb použít dřevo bukové. Tento způsob hodnocení je však pouze orientační, neboť nezohledňuje důležitost (váhy) jednotlivých kritérií.

5.3.2 Hodnocení metodami PROMETHEE I a II

Metodika hodnocení metodou PROMETHEE je popsána v kap. 4.1.2.

Na základě Tab. 27 byla sestavena kritériální matice **R**:

$$\mathbf{R} = \begin{matrix} & \begin{matrix} i_1 & i_2 & i_3 & i_4 & i_5 & i_6 & i_7 & i_8 \end{matrix} \\ & \begin{matrix} \max & \max & \max & \min & \min & \min & \min & \max \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccccccccc} 108 & 19947 & 54 & 620 & 17,5 & 6 & 1 & 10,3 \\ 92 & 18155 & 47 & 624 & 12,6 & 8 & 6 & 2 \\ 102 & 17925 & 59 & 667 & 19,7 & 9 & 9 & 0 \\ 94 & 13996 & 42 & 556 & 12,5 & 6 & 4 & 0,2 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (22)$$

Kritériální matice **R** byla modifikována do tvaru se všemi kritérii maximalizačními. Upravená kritériální matice **R_M** má tvar:

$$\mathbf{R}_M = \begin{matrix} & \begin{matrix} i_1 & i_2 & i_3 & i_4 & i_5 & i_6 & i_7 & i_8 \\ \text{max} & \text{max} & \text{max} & \text{max} & \text{max} & \text{max} & \text{max} & \text{max} \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccccccccc} 108 & 19947 & 54 & 47 & 2,2 & 3 & 8 & 10,3 \\ 92 & 18155 & 47 & 43 & 7,1 & 1 & 3 & 2 \\ 102 & 17925 & 59 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 94 & 13996 & 42 & 111 & 7,2 & 3 & 5 & 0,2 \end{array} \right] \end{matrix} \quad (23)$$

Váhy kritérií určené podle metodiky popsané v kap. 4.1.2 jsou shrnuty v Tab. 28.

Tab. 28 Hodnoty váhy i -tého kritéria určené Metodou postupného rozvrhu vah a Saatyho metodou.

č. skupiny	skupina kritérií	váha skupiny $v_{sk,i}$	i	kritérium	váha krit.ve skup. $v_{k,i}$	výsledná váha kritéria v_i
I	mechanické vlastnosti	0,316	1	pevnost v ohybu	0,4	0,126
			2	modul pružnosti v ohybu	0,4	0,126
			3	pevnost v tlaku	0,2	0,063
II	fyzikální vlastnosti	0,263	4	objemová hmotnost	0,143	0,038
			5	sesychání objemové	0,571	0,150
			6	opracovatelnost	0,286	0,075
III	cena	0,421	7	výskyt suků, rovnovláknitost	0,167	0,070
			8	zvětšení porostní plochy	0,833	0,351
			Σ			1,000

Hodnoty relací $\pi(A_j, A_k)$, součet všech kladných (“výstupních”) vztahů F_j^+ a záporných (“vstupních”) vztahů F_j^- , rozdíl mezi nimi $F_j = F_j^+ - F_j^-$ ($j = 1, 2, \dots, n$) a pořadí všech variant hodnocených metodou PROMETHEE II jsou shrnuty v Tab. 29.

Tab. 29 Výsledky získané výpočtem výhodnosti použití hodnocených druhů tvrdých dřevin metodou PROMETHEE.

tvrdé dřeviny (alternativy)	a_1	a_2	a_3	a_4
a_1	0	0,821	0,893	0,984
a_2	0,179	0	0,75	0,357
a_3	0,107	0,25	0	0,25
a_4	0,215	0,464	0,5	0
F^+	2,698	1,286	0,607	1,179
F^-	0,501	1,535	2,143	1,591
F	2,197	-0,249	-1,536	-0,412
pořadí	1	2	4	3

Podle výsledků multikriteriální analýzy získaných pomocí metody PROMETHEE II je nejvýhodnějším druhem tvrdého dřeva ze souboru (buk, dub, habr, javor) varianta a_1 (buk) (v Tab. 29 pořadí 1). U buku je očekávaný největší nárůst porostní plochy, a tedy i největší pokles ceny bukového řeziva. Oproti ostatním hodnoceným dřevinám bylo dřevo buku relativně rovnoláknité s nízkým výskytem suků, zato mělo poměrně špatné vlastnosti z hlediska tvarové stability průřezu (sesychání). Z hlediska mechanických vlastností i objemové hmotnosti je srovnatelný s dubem, z hodnocených dřevin má společně s javorem nejlepší opracovatelnost.

Na druhém místě se umístila varianta a_2 (dub), na třetím varianta a_4 (javor) a varianta a_3 (habr) byla vyhodnocena jako nejméně vhodná. Habr je naše nejtvrdší dřevina, a přestože jeho mechanické vlastnosti výrazně předčí všechny ostatní posuzované dřeviny, ostatní nevhodné vlastnosti odsunuly tuto variantu až na poslední pozici. Habr má z hodnocených dřevin nejhorší opracovatelnost, má točivá nepravidelná vlákna a častý výskyt suků, jeho objemová stabilita vlivem vlhkosti je nejhorší z hodnocených dřevin.

Hodnocení dle metody PROMETHEE je do jisté míry variabilní, volba kritérií a jejich vah ovlivňuje celkový výsledek rozhodování. Volba optimální varianty závisí na postoji rozhodovatele a jeho preferencích. K objektivnímu posouzení všech variant je důležitým krokem správná volba kritérií, stejně jako stanovení vah, které vyjadřují důležitost jednotlivých kritérií [105]. V provedeném výpočtu byl největší důraz kladen na procentuální zvětšení porostní plochy, neboť je zde oprávněný předpoklad výrazného vlivu tohoto kritéria na cenu řeziva.

Pro srovnání byl proveden rovněž výpočet stejné úlohy, ovšem se stejnou vahou pro všechna kritéria. I v tomto případě byla varianta a_1 (buk) vyhodnocena jako nejvhodnější a varianta a_3 (habr) jako nejméně vhodná. Došlo však ke změně na druhé a třetí pozici, kde varianta a_4 (javor) byla hodnocena jako druhá nejvhodnější. Zde se projevil vliv kritéria 1 – objemová hmotnost, kterou má javor nejnížší ze všech hodnocených dřevin, rovněž objemové změny působením vlhkosti (kritérium 4) má společně s dubem nejmenší, opracovatelnost (kritérium 6) je srovnatelná s dřevem bukovým.

Do hodnocení by se dala zahrnout rovněž další kritéria, případně by některá kritéria mohla být vynechána. Jedná se zejména o pevnosti, které jsou zde zastoupeny ve dvou kritériích. Nutno ovšem zmínit, že i při vynechání jedné z pevností zůstává pořadí stejné.

Při hodnocení vhodnosti použití tvrdých dřevin pro nosné konstrukce pozemních staveb se ale ukázalo, že použití bukového dřeva je i při různých modifikacích vstupních podmínek hodnoceno jako nejvhodnější ze zvolených variant.

V souvislosti s výsledky multikriteriální analýzy se disertační práce dále zaměřuje na prvky s využitím bukového dřeva.

5.4 Experimentální výzkum zubovitých spojů vybraných listnatých dřevin

Výzkum zubovitých spojů byl proveden podle metodiky popsané v kap. 4.2.2. Jednalo se o zkoušky pevnosti ve čtyřbodovém ohybu bukových lamel o rozměrech $50 \times 30 \times 570$ mm spojovaných uprostřed rozpětí zubovitým spojem s délkou ozubu 23 mm. Vlhkost vzorků byla určena dle kap. 0 a byla průměrně 9,9 % u vzorků se spojem a 9,8 % u referenčních neslepených vzorků. Experimenty popsány v této kapitole budou dále v textu označeny č. 2.

5.4.1 Výsledky experimentů

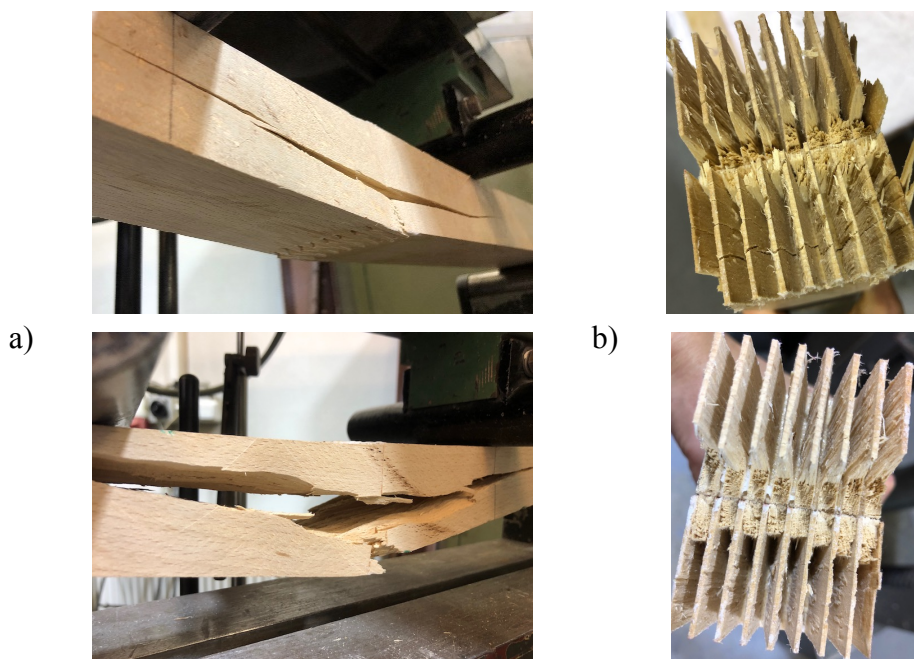
Podle výsledků experimentálních testů dosahovaly referenční vzorky bez lepeného spoje pevnosti v ohybu $f_{m,12,l}$ průměrně $110,7 \text{ N/mm}^2$. Pevnosti v ohybu lamel spojených zubovitým spojem $f_{m,12,j}$ dosahovala průměrně $70,3 \text{ N/mm}^2$. Výsledky jsou shrnuty v Tab. 30. Je zřejmé, že vzorky spojené zubovitým spojem dosahují přibližně 65% pevnosti v ohybu ve srovnání s nelepými referenčními vzorky.

Tab. 30 Experiment 2, pevnost v ohybu lamel spojených zubovitým spojem s použitím PUR lepidla, srovnání s referenčními vzorky.

	vlhkost vzorku ω v %	objemová hmotnost v kg/m^3 (experiment 2A)	pevnost v ohybu $f_{m,12}$ v N/mm^2 (experiment 2B)		
			průměr \bar{x}	medián \tilde{x}	směrodatná odchylka s
Lepené vzorky	9,8	693	67,7	70,3	6,82
Referenční vzorky	9,8	702	106,8	110,7	13,86

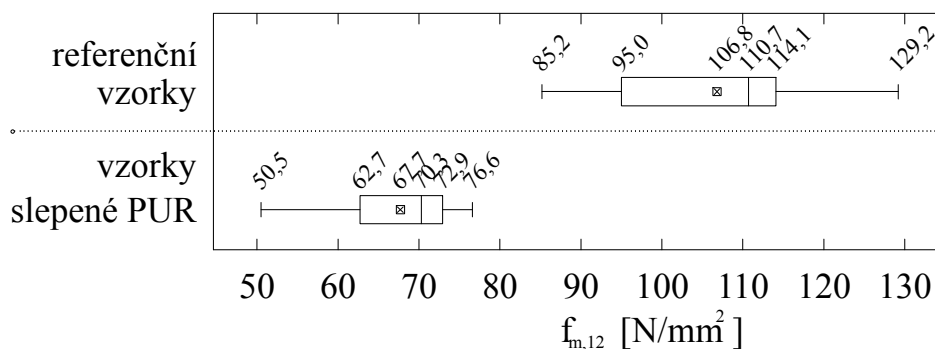
V ohybových testech bylo možno rozlišit dva režimy porušení vzorků, jak je zobrazeno na Obr. 80. K selhání lepených spojů většiny vzorků došlo uprostřed vzorku, kdy se zubovitý spoj na tažené části průřezu rozestoupil, případně došlo zároveň v menší míře k vytvoření vodorovných trhlin mezi tlačnou a taženou částí (Obr. 80 b). Oddělení proběhlo buď přímo ve vrstvě lepidla nebo v její těsné blízkosti. Jen u přibližně čtvrtiny vzorků došlo k rozvoji velké vodorovné trhliny mezi tlačnou a taženou částí tak, jak je zobrazeno na Obr. 80 a). Po úplném

rozlomení vzorků bylo podle bílého povlaku na lepených plochách zubovitého spoje patrné, že lepidlo bylo správně nanесeno na celou plochu ozubů.



Obr. 80 Porušení vzorků při zatěžování: a) porušení ve vrstvě lepidla s vodorovnou trhlinou mezi tlačenou a taženou částí, b) nejčastější porušení podél lepených ploch zubovitého spoje s určitým selháním v kořenech ozubů [archiv autora].

Výsledky experimentu 2 lze rovněž vyjádřit pomocí krabicového grafu (Obr. 81).

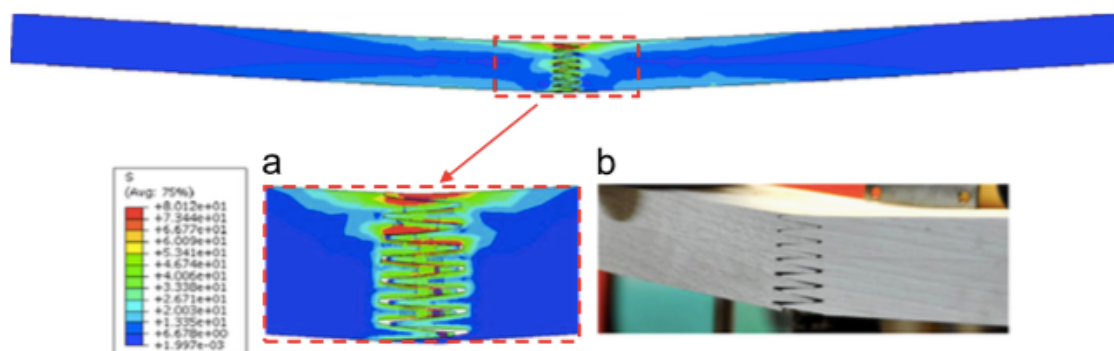


Obr. 81 Výsledky zkoušek pevnosti ve čtyřbodovém ohybu vyjádřené krabicovým grafem.

Účinnost zubovitého spoje byla podle podmínky (1) vyhodnocena jako vyhovující. Poměr lepené plochy zubů k základní ploše průřezu A_g/A je pro použitou geometrii roven 7,13. Naopak únosnost zubovitého spoje však nevyhovuje podmínce (20), pevnost v ohybu zubovitých spojů $f_{m,j}$ s hodnotou 67,7 N/mm² nedosahuje pevnosti v ohybu lamel bez spoje $f_{m,l}$, jež byla 106,8 N/mm².

5.4.2 Srovnání s literaturou

Výsledky experimentu 2 potvrdily závěry literatury [62] i v lokálních podmínkách, tedy s použitím bukového řeziva z České republiky a lepidla, které se pro zubovité spoje lepených lamelových prvků běžně používá. Oproti experimentu popsanému v tomto článku, byl v experimentu popsaném v literatuře [62] testován ležatý spoj (zuby viditelné zboku lamely) spojený MUF lepidlem (Obr. 82).



Obr. 82 Srovnání selhání zubovitého spoje numerické a experimentální [62].

Jak bylo zmíněno, na spolehlivost spoje má vliv mnoho faktorů, geometrie zubovitého spoje a použité lepidlo jsou pouze některé z nich. Významným a důležitým faktorem jsou také podmínky výroby. V popsaném experimentu stejně jako v experimentu popsaném v [62] byly vzorky vyráběny ručně. Je zřejmé, že ruční výrobou nelze dosáhnout takové kvality jako výrobou strojní, i když byly dodrženy všechny normativní podmínky a rovněž požadavky výrobce (geometrie a samosvornost spoje, vlhkost dřeva při lepení, požadavky na ruční nanášení lepidla, doba mezi frézováním a lepením, lisovací tlak a doba jeho působení, vytvrzování). Pro výrobu vzorků byla použita metodika podle normy ČSN EN 14 080 [55]. Zmíněnou normu při výrobě vzorků respektovali rovněž autoři [62]. Tato norma je však platná pouze pro měkké dřevo. Požadavky této normy tedy nemusí být pro bukové dřevo vyhovující, zejména nemusí vyhovovat např. požadavek na lisovací tlak.

Srovnání s požadavky [57] uvedené v Tab. 21 nebylo možné provést, neboť nebyla určována charakteristická hodnota ohybové pevnosti, pro kterou by bylo nutné provést zkoušky na minimálně 40 zkušebních tělesech [110].

5.5 Experimentální výzkum lepených lamelových prvků z vybraných listnatých dřevin

Výzkum lepených lamelových prvků byl proveden podle metodiky popsané v kap. 4.2.3. Jedná se o určení pevnosti a modulu pružnosti v čtyřbodovém ohybu. Experimenty týkající se lepených lamelových prvků budou dále označeny číslem 3.

Jako primární materiál pro výrobu LLD nosníků bylo vybráno bukové dřevo, jež bylo vyhodnoceno jako nejvýhodnější ze souboru hodnocených listnatých dřevin pro konstrukce pozemních staveb (jak bylo popsáno v kap. 5.3).

Bukové dřevo má relativně velkou objemovou hmotnost. Použití homogenních bukových prvků proto s sebou nese určité nevýhody, např. horší manipulace na stavbě, dražší doprava apod. Ve snaze o vylehčení prvku byl tedy navržen hybridní nosník s využitím měkkého topolového dřeva ve vnitřní zóně lamel (Obr. 35).

Topol je rychle rostoucí dřevina s měkkým lehkým dřevem, je velmi málo trvanlivý a má nízké pevnostní parametry. Jeho využitím by bylo dosaženo jisté efektivity: použitím vysoce funkčního bukového dřeva na nejvíce namáhaných částech průřezu a na méně namáhané lamely ve vnitřní zóně ne tolik únosného dřeva topolového.

Pro použití topolu je důležitá zejména jeho

- dostupnost,
- objemová hmotnost,
- opracovatelnost,
- spojovatelnost a
- trvanlivost.

Pro použití v lepených lamelových nosnících, které jsou určeny především do stropních a střešních konstrukcí, jsou pak důležité zejména tyto fyzikální a mechanické vlastnosti:

- předpoklady k lepení,
- sesychání,
- pevnost v ohybu,
- modul pružnosti v ohybu.

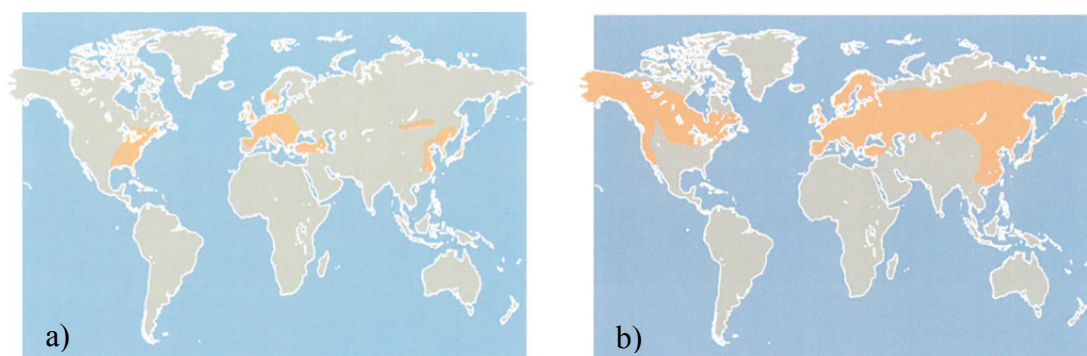
Objemová hmotnost, pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu buku a topolu byly určovány experimentálně na vzorcích lamel, jak je popsáno v kap. 0. Ostatní vlastnosti jsou

srovnány hodnotami převzatými z odborné literatury v následujících kapitolách. Hodnoty získané pro hybridní nosníky jsou srovnány s nosníky homogenními a rovněž s referenčními smrkovými. Experimenty týkající se nosníků z LLD budou dále značeny číslem 3.

5.5.1 Bukové a topolové dřevo

5.5.1.1 Dostupnost

Buk roste v mírných severních oblastech Evropy, Kanady a Spojených států amerických a také v některých oblastech Asie, Japonska a severní Afriky, topol roste v severním mírném pásu, od Kanady a severu Spojených států do Evropy a odtud do Asie až po Čínu [16].



Obr. 83 Výskyt a) buku, b) topolu v celosvětovém měřítku [16].

V České republice je topolové dřevo poměrně dostupné. Běžný je u nás topol černý (*Populus nigra*) a topol osika (*Populus tremula*), lze jej rovněž dovážet z lužních oblastí Slovenska či Maďarska, kde je produkční doba v hospodářských lesích přibližně 25 let (přičemž i tento rychlerostoucí druh se využívá na překližky, nábytek ale i konstrukční účely). V [4], [5], [11], [12] je topol uváděn pod ostatním listnatým dřevem a jeho podíl tvoří přibližně 1/3 této položky. Podle [11] byla porostní plocha topolu osiky v České republice v roce 2017 rovna 6 950 ha a ostatních topolů 6 105 ha.

5.5.1.2 Opracovatelnost, spojovatelnost, lepení, trvanlivost

Bukové dřevo je dobře opracovatelné ručně i strojně a velmi dobře drží spoje, velmi snadno se lepí a lze jej výborně povrchově upravovat. Je málo trvanlivé, pro impregnační látky je však propustné.

Topolové dřevo se snadno opracovává ručně i strojně, je však třeba velmi tenké břity, protože dřevo je drsnější s plstnatým povrchem. Dobře drží spoje, vruty a hřebíky, a snadno se

lepi. Bělové dřevo, které tvoří podstatnou část stromu, snadno podléhá zkáze, ale je propustné pro impregnační látky.

Tab. 31 Srovnání opracovatelnosti topolu a buku podle [16].

	buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i>)	topol (<i>Populus spp.</i>)
opracovatelnost	6	4
tvrdost (slovně)	středně tvrdá	měkká
spoje	velmi dobře drží	dobře drží
lepení	velmi snadné	snadné

5.5.1.3 Sesychání

Bukové dřevo vyžaduje při sušení zvláštní péči, protože schne velmi rychle a dobře, ale vykazuje výrazné tvarové změny, značně sesychá. Topol schne rychle a dobře, s velmi nízkou tendencí se deformovat a při použití pak vykazuje střední tvarovou stabilitu. Srovnání hodnot sesychání uvedených v literatuře [28] a [9] je uvedeno v Tab. 32. Protože literatury [9] a [28] uvádějí více druhů topolu, proto bylo uvedeno rozmezí uvedených hodnot. Literatura [33] hodnoty pro topol neuvádí.

Tab. 32 Sesychání od čerstvého k suchému stavu vyjádřené v % z rozměrů dřeva v čerstvém stavu.

		buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i>)	topol (<i>Populus spp.</i>)
sesychání podél vláken α_l	[28]	0,3	0,3–0,7
	[9]	0,3	–
sesychání radiální α_r	[28]	5	3,0–5,2
	[9]	5,3	2,5–3,2
sesychání tangenciální α_t	[28]	11,8	6,7–8,75
	[9]	12,5	8,3–8,6
sesychání objemové α_V	[28]	17,5	11,0–14,3
	[9]	17,5	–

5.5.2 Zkoušky lamel

Pro určení vlastností dřeva, ze kterého byly vyrobeny lepené nosníky, byly provedeny zkoušky objemové hmotnosti, pevnosti a modulu pružnosti ve čtyřbodovém ohybu neslepených lamel. Zkoušeny tedy byly dřeviny: buk lesní (*Fagus sylvatica*), topol (*Populus*), smrk ztepilý (*Picea abies*).

5.5.2.1 Objemová hmotnost a vlhkost lamel (experiment 3A)

Objemová hmotnost lamel byla určována podle metodiky popsané v kap. 4.2.3.6. Vlhkost byla určena podle metodiky popsané v kap. 4.2.3.7 a dosahovala u bukových lamel průměrně 7,8 %, topolových 7,7 % a smrkových lamel 8,3 %.

Objemová hmotnost bukového dřeva přepočítaná pro 12% vlhkost byla 727 kg/m³ a topolového 394 kg/m³, smrkového 454 kg/m³. Lze tedy říci, že objemová hmotnost topolu je oproti buku přibližně poloviční, a je nižší než objemová hmotnost smrku. Výsledné hodnoty objemové hmotnosti dřeva lamel zjištěných v experimentu 3A jsou uvedeny v Tab. 33.

Tab. 33 Objemová hmotnost dřeva lamel zjištěná v experimentu 3A, průměrné hodnoty.

Objemová hmotnost ρ v kg/m ³	buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i>)	topol (<i>Populus spp.</i>)	smrk ztepilý (<i>Picea abies</i>)
pro $\omega = 12$ %	727	394	454
pro $\omega = 0$ %	664	356	409

V Tab. 34 je uvedeno srovnání experimentálně zjištěných hodnot s hodnotami dostupnými v odborné literatuře; z literatury [33] byl do srovnání vybrán nejbližší příbuzný druh ^{*1}buk velkolistý (*Fagus grandifolia*). Literatury [9] a [28] uvádějí více různých druhů topolu, proto bylo uvedeno rozmezí uvedených hodnot.

Tab. 34 Objemová hmotnost – srovnání výsledků experimentu s odbornou literaturou.

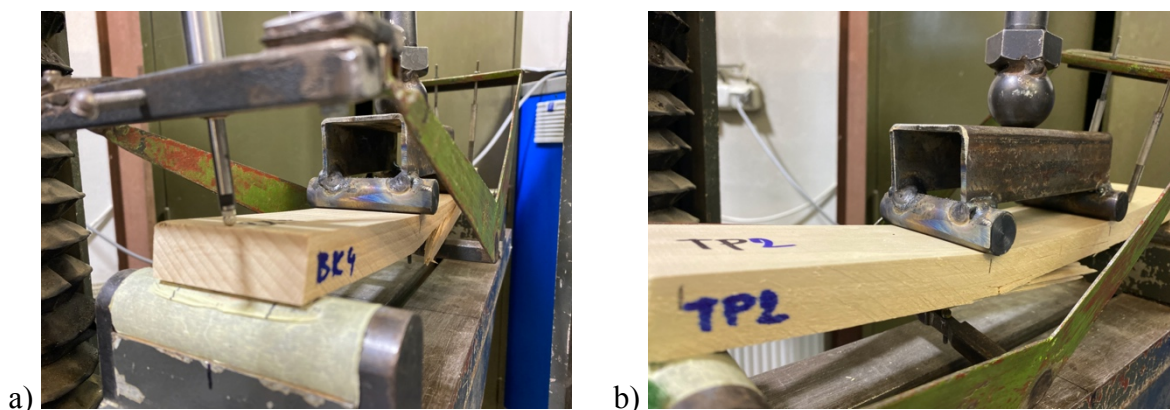
Objemová hmotnost ρ v kg/m ³	buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i>)	topol (<i>Populus spp.</i>)	smrk ztepilý (<i>Picea abies</i>)
experiment 3A pro $\omega = 12$ %	727	394	454
podle [33] – pro $\omega = 12$ %	640 ^{*1}	–	440
Experiment 3A pro $\omega = 0$ %	664	356	409
podle [108] – pro $\omega = 0$ %	680	–	430
podle [9] – pro $\omega = 0$ %	684	324–395	392
podle [28] – pro $\omega = 0$ %	680	350–410	430

Objemová hmotnost smrkových lamel podle experimentu 3A je srovnatelná s hodnotami, které uvádí odborná literatura, rovněž objemová hmotnost topolu je s hodnotami v literatuře srovnatelná, i když se pohybuje spíše na dolní hranici uvedeného rozmezí hodnot. Zato objemová hmotnost buku podle experimentu 3A byla vyhodnocena vyšší, než se uvádí v odborné literatuře [33], ale mírně nižší, než se uvádí v literaturách [9] a [28].

Objemovou hmotnost smrkových a topolových lamel lze také orientačně srovnat s hodnotami, které pro prkna nebo fošny pro lepené lamelové dřevo uvádí norma ČSN EN 14080 [55] v tabulce 1. Zde jsou však uvedeny charakteristické hodnoty, a to od 290 kg/m³ pro T-třidu prken nebo fošen T8 (C14) až po 430 kg/m³ pro T30 (C50). Pro srovnání s touto normou by bylo nutné určit charakteristické hodnoty podle výsledků zkoušek na minimálně 40 vzorcích [110]. Požadavky na bukové lamely jsou uvedeny v [57], ale jsou specifikovány dynamickým modulem pružnosti E_{dyn} , který v rámci této práce určován nebyl.

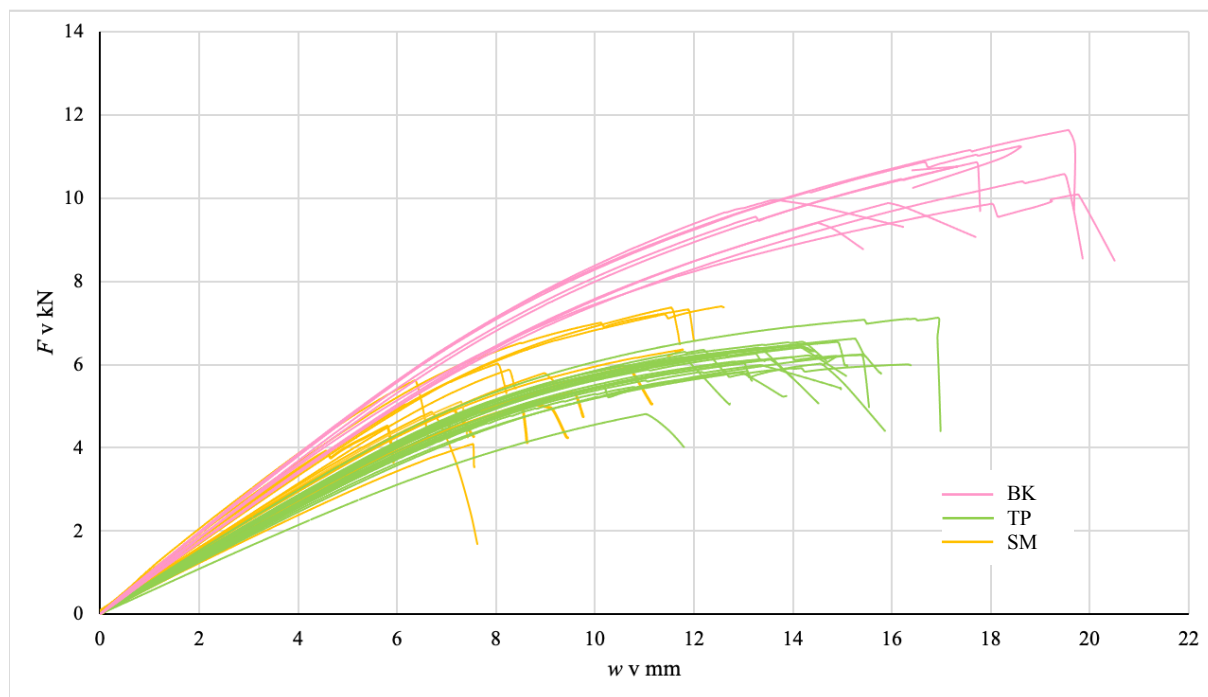
5.5.2.2 Pevnost a modul pružnosti lamel ve čtyřbodovém ohybu

Pevnost a modul pružnosti lamel ve čtyřbodovém ohybu byla určena podle metodiky popsané v kap. 4.2.3.5. Provádění zkoušky je zobrazeno na Obr. 84.



Obr. 84 Zkoušení pevnosti a modulu pružnosti lamel ve čtyřbodovém ohybu, a) buk, b) topol [archiv autora].

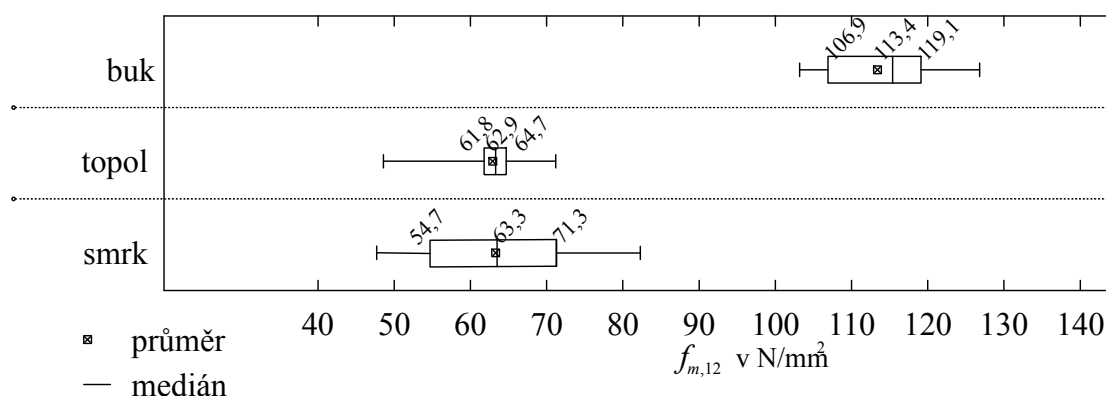
Grafy závislosti síly na deformaci všech zkoušených prvků byly pro srovnání zobrazeny v jednom grafu na Obr. 85. Je zřejmé, že nejmenší maximální síly bylo dosaženo u smrkových a topolových lamel, kde byla průměrná maximální dosažená síla u smrku 5,71 kN a u topolu 6,21 kN, zatímco u buku byla průměrná maximální dosažená síla 10,5 kN. Největší deformace dosahovaly bukové lamely, a to v průměru 17,4 mm. Velké deformace dosahovaly rovněž topolové lamely, a to průměrně 14,04 mm, nejmenší deformace 8,20 mm v průměru dosahovaly lamely smrkové.



Obr. 85 Zkouška lamel ve čtyřbodovém ohybu (experiment 3B), závislost síly na deformaci;
SM = smrk, TP = topol, BK = buk.

Pevnost lamel ve čtyřbodovém ohybu (experiment 3B)

Podle výsledků provedených zkoušek byla průměrná pevnost bukových lamel v ohybu $113,4 \text{ N/mm}^2$, smrkových lamel $63,3 \text{ N/mm}^2$ a topolových lamel $62,9 \text{ N/mm}^2$. Zjištěná pevnost v čtyřbodovém ohybu je zobrazena v grafu na Obr. 86.



Obr. 86 Výsledky testování pevnosti ve čtyřbodovém ohybu lamel (experiment 3B) vyjádřené pomocí krabicového grafu.

Výsledné hodnoty zjišťované pevnosti v ohybu jsou shrnuty v Tab. 35, kde je provedeno rovněž srovnání s hodnotami uvedenými v odborné literatuře. Z literatury [33] byl do srovnání vybrán nejbližší příbuzný druh: ^{*1} značí buk velkolistý (*Fagus grandifolia*). Literatury [9] a [28]

uvádějí více různých druhů topolu, proto bylo uvedeno rozmezí uvedených hodnot. Hodnoty podle [28] byly přepočteny z hodnoty pro 15% vlhkost dle vztahu (12).

Tab. 35 Experimentálně určená pevnost lamel v ohybu a srovnání hodnot s odbornou literaturou.

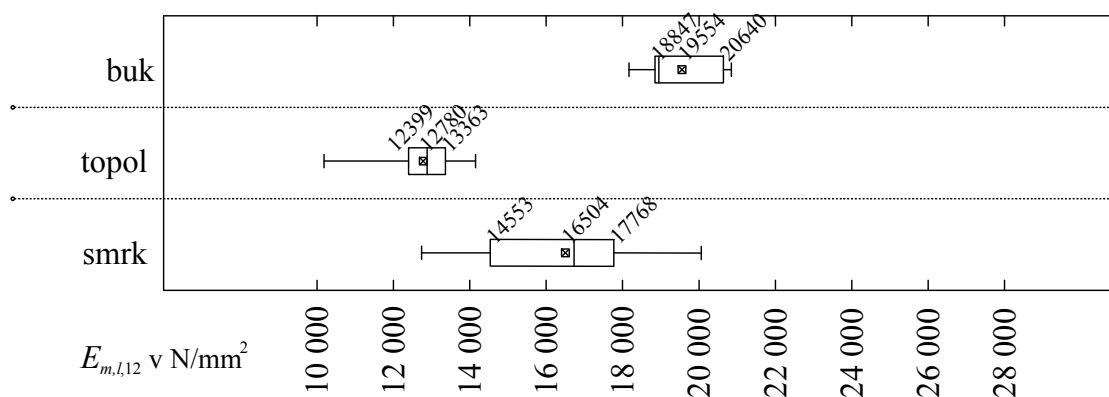
$f_{m,12}$ v N/mm ²	buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i>)	topol (<i>Populus spp.</i>)	smrk ztepilý (<i>Picea abies</i>)
Experiment 3B:			
průměr \bar{x}	113,4	62,9	63,3
medián \tilde{x}	115,4	63,3	63,5
směrodatná odchylka s	7,4	4,2	10,2
podle [9]	124	46,0–50,3	R 70,4 T 72,9
podle [28]	115	46,1–60,4	56
Podle [108]	123	–	78
podle [33]	103 ^{*1}	–	–

Jak je zřejmé z Tab. 35 experimentálně zjištěná pevnost v ohybu bukových lamel se pohybuje v rozmezí hodnot uvedených v odborné literatuře, experimentálně zjištěná průměrná hodnota ohybové pevnosti byla 113,4 N/mm², zatímco podle literatury je to 103–124 N/mm². Ohybová pevnost topolu se ve srovnání s literaturou pohybuje podle provedeného experimentu spíše u horní hranice daného rozmezí uvedených hodnot, experimentálně zjištěná průměrná hodnota je 62,9 N/mm², podle literatury se pohybuje mezi 46,0–60,4 N/mm². Pevnost v ohybu smrkových lamel se pohybuje v dolní třetině rozmezí hodnot uváděných v odborné literatuře: experimentálně zjištěná průměrná hodnota ohybové pevnosti byla 63,3 N/mm², zatímco podle literatury je to 56–78 N/mm².

Buk má ve srovnání s topolem podle výsledků experimentu o 80 % vyšší pevnost, ve srovnání se smrkem má buk vyšší pevnost o 79 %. Pevnost smrkového a topolového dřeva lamel je téměř srovnatelná.

Modul pružnosti lamel ve čtyřbodovém ohybu (experiment 3C)

Podle výsledků provedených zkoušek byl průměrný modul pružnosti bukových lamel v ohybu 19 554 N/mm², topolových lamel 12 780 N/mm² a smrkových lamel 16 504 N/mm². Zjištěná pevnost v čtyřbodovém ohybu je zobrazena v grafu na Obr. 87.



Obr. 87 Výsledky testování modulu pružnosti ve čtyřbodovém ohybu lamel (experiment 3C) vyjádřené pomocí krabicového grafu.

Výsledné hodnoty zjišťovaného modulu pružnosti v ohybu jsou shrnuty v Tab. 36, kde je provedeno rovněž srovnání s hodnotami uvedenými v odborné literatuře. Z literatury [33] byl do srovnání vybrán nejbližší příbuzný druh, ^{*1} značí buk velkolistý (*Fagus grandifolia*). Literatury [9] a [28] uvádějí více různých druhů topolu, proto bylo uvedeno rozmezí uvedených hodnot. Hodnota z [28] byla přepočteno z hodnoty pro 15% vlhkost podle vztahu (13).

Tab. 36 Experimentálně určený modul pružnosti lamel v ohybu a srovnání hodnot s odbornou literaturou.

$E_{m,l,12}$ v N/mm^2	buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i>)	topol (<i>Populus spp.</i>)	smrk ztepilý (<i>Picea abies</i>)
Experiment 3C:			
průměr \bar{x}	19 554	12 780	16 504
medián \tilde{x}	18 947	12 882	16 727
směrodatná odchylka s	1 030	846	1 921
podle [9] pro $\omega = 10\text{--}12\%$	12 966	5 405–6 300	8 948
podle [28]	16 495	7 383–9 203	–
Podle [108]	16 000	–	–
podle [33]	11900 ^{*1}	–	8 500

Z Tab. 36 je zřejmé, že experimentálně zjištěný modul pružnosti bukových lamel je mírně vyšší, než udává odborná literatura, zjištěný průměrný modul pružnosti buku byl $19\,554\text{ N/mm}^2$, zatímco podle literatury se pohybuje v rozmezí $11\,900\text{--}16\,495\text{ N/mm}^2$. Zjištěný modul pružnosti buku se však blíží modulu pružnosti buku zjištěného v experimentu v kap. 5.2.3. Zjištěné moduly pružnosti lamel topolu i smrku jsou vyšší, než udává odborná literatura. Topolové lamely vykazovaly modul pružnosti v ohybu $12\,780\text{ N/mm}^2$, zatímco odborná literatura udává hodnoty v rozmezí $5\,405\text{--}9\,203\text{ N/mm}^2$. Smrkové lamely vykazovaly

průměrný modul pružnosti v ohybu ještě vyšší, a to 16 504 N/mm², zatímco odborná literatura udává rozmezí hodnot 8 500–8 948 N/mm².

5.5.3 Zkoušky lepených lamelových nosníků

Zkoušky lepených lamelových nosníků jsou popsány v kap. 4.2.3. Zkoušeny byly nosníky homogenní bukové (dále označované BK), hybridní bukově-topolové (dále označované HYB) a referenční homogenní smrkové (dále značené SM).

5.5.3.1 Objemová hmotnost a vlhkost lepených lamelových nosníků (experiment 3D)

Objemová hmotnost dřeva lepených lamelových nosníků byla určována podle metodiky popsané v kap. 4.2.3.4. Vlhkost byla určena podle metodiky popsané v kap. 4.2.3.3 a dosahovala u bukových homogenních nosníků průměrně 8,76 %, u hybridních bukově-topolových nosníků 7,98 %, u smrkových nosníků 8,49 %.

Průměrná objemová hmotnost LLD nosníků přepočítaná pro 12% vlhkost bukových homogenních nosníků byla 723 kg/m³, hybridních bukově-topolových nosníků 605 kg/m³, smrkových homogenních nosníků 443 kg/m³. Lze tedy říci, že objemová hmotnost hybridních bukově-topolových nosníků je ve srovnání s homogenními bukovými nosíky přibližně o čtvrtinu menší, objemová hmotnost smrkových nosníků je pak oproti bukovým téměř poloviční. Hybridní nosíky mají oproti smrkovým objemovou hmotnost vyšší přibližně o 37 %. Výsledné hodnoty experimentu jsou uvedeny v Tab. 37. Hodnota označená * značí dopočítanou hodnotu – objemová hmotnost odpovídající hybridnímu nosíku byla vypočtena jako vážený průměr objemových hmotností rozdílných zón lamel.

Tab. 37 Experiment 3D – objemová hmotnost LLD hmotnost ρ v kg/m³, průměrné hodnoty pro $\omega = 12$ %.

	BK	HYB	SM
objemová hmotnost ρ v kg/m ³	bukové homogenní LLD nosníky	hybridní bukově- topolové LLD nosníky	smrkové homogenní LLD nosníky
nosníky – experiment 3D	723	605	443
lamely – experiment 3A (Tab. 33)	727	616*	454

Ve srovnání s objemovou hmotností lamel uvedenou pro buk a smrk v Tab. 33 lze říci, že je objemová hmotnost lepených nosníků srovnatelná až mírně nižší než objemová hmotnost lamel, ze kterých je vyroben.

Pro přibližné srovnání lze uvést tabulku převzatou z normy ČSN EN 14080 [55], která uvádí průměrné hodnoty hustoty pro homogenní lepené lamelové dřevo (Tab. 38). Ve srovnání s touto tabulkou odpovídá hodnota pro smrkové homogenní LLD nosníky určená v experimentu třídě GL 26.

Tab. 38 Průměrná hodnota objemové hmotnosti $\rho_{g,mean}$ v kg/m^3 pro homogenní lepené lamelové dřevo [55].

	Třída pevnosti lepeného lamelového dřeva						
	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
objemová hmotnost	370	410	420	445	460	480	490

V Tab. 38 je h označení pro homogenní LLD (názvosloví viz kap. 2.3.3.1). Obdobnou tabulku s hodnotami pro bukové a hybridní lepené lamelové dřevo lze nalézt v [57] (Tab. 39). Objemová hmotnost všech tříd pevnosti lamelového dřeva je zde uvedena jako shodná. V obou případech (homogenní i hybridní nosníky) byla objemová hmotnost zjištěná v experimentu vyšší.

Tab. 39 Charakteristická hodnota objemové hmotnosti ρ_k v kg/m^3 pro bukové lepené lamelové dřevo [57].

	Třída pevnosti lepeného lamelového dřeva					
	GL 28h	GL 32c	GL 36c	GL 40c	GL 44c	GL 48c
objemová hmotnost	650					

V Tab. 39 je h označení pro homogenní LLD, c pro LLD kombinované (názvosloví viz kap. 2.3.3.1).

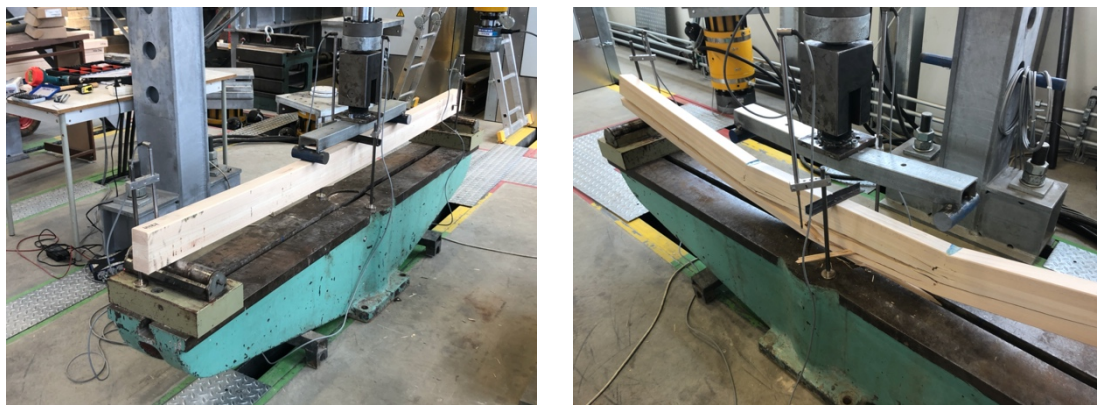
Tab. 40 Charakteristická hodnota objemové hmotnosti $f_{m,k}$ v N/mm^2 pro hybridní lepené lamelové nosníky s krajními bukovými lamelami [57].

	Třída pevnosti lepeného lamelového dřeva					
	GL 28 hyb	GL 32 hyb	GL 36 hyb	GL 40 hyb	GL 44 hyb	GL 48 hyb
objemová hmotnost	380					

V Tab. 40 je hyb označení pro hybridní LLD (názvosloví viz kap. 2.3.3.1).

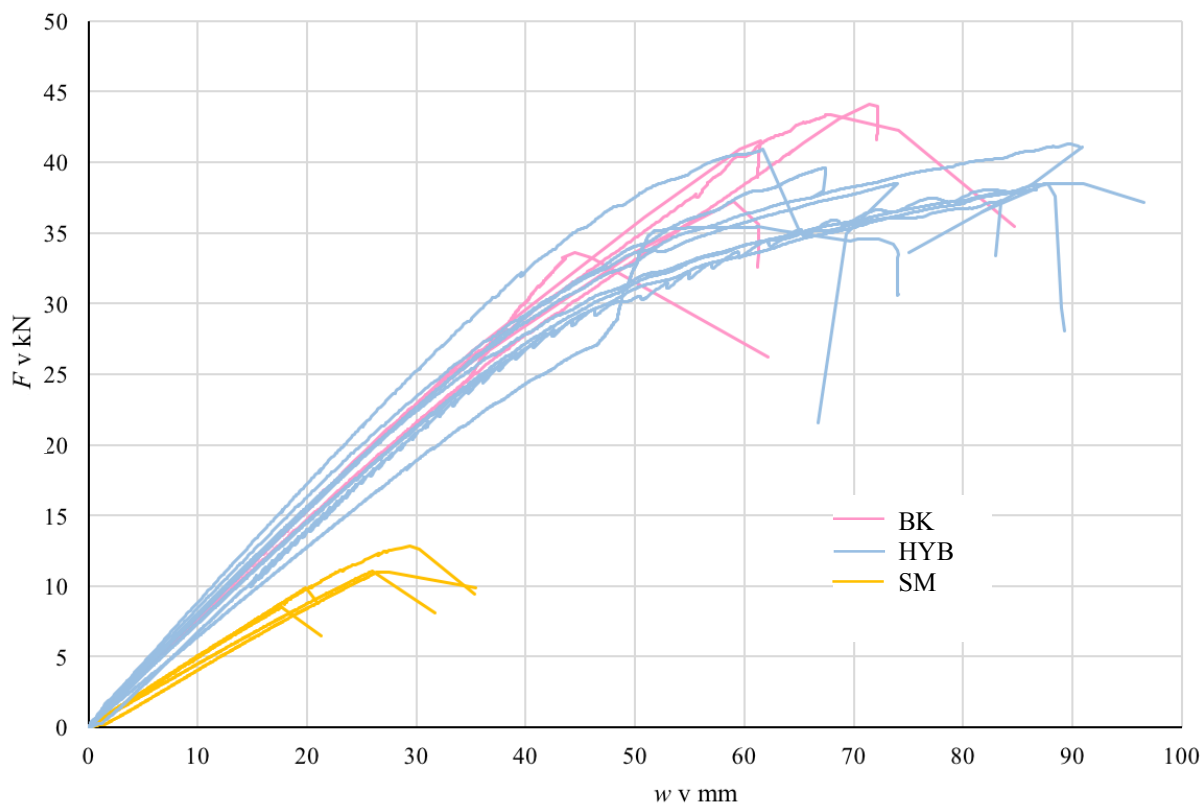
5.5.3.2 Pevnost a modul pružnosti LLD nosníků ve čtyřbodovém ohybu

Pevnost v ohybu a modul pružnosti v ohybu lepených nosníků byla určena podle metodiky popsané v kap. 4.2.3.2. Uspořádání zkoušky je zobrazeno na Obr. 88.



Obr. 88 Zkoušení pevnosti a modulu pružnosti lepených nosníků ve čtyřbodovém ohybu [archiv autora].

Grafy závislosti síly F na deformaci w v všech zkoušených prvcích byly pro srovnání zobrazeny v jednom grafu na Obr. 89.



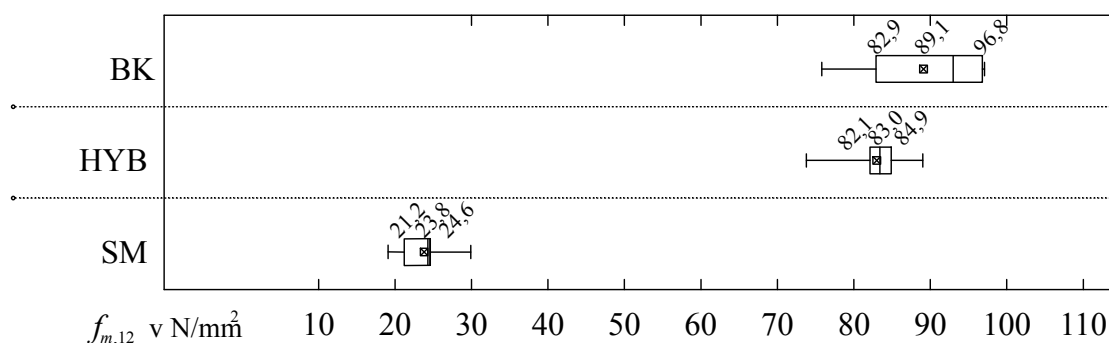
Obr. 89 Pracovní diagramy lepených lamelových nosníků; BK = bukové homogenní lepené lamelové nosníky, HYB = bukovo-topolové hybridní lepené lamelové nosníky, SM = smrkové homogenní lepené lamelové nosníky.

Je zřejmé, že nejmenší maximální síly bylo dosaženo u smrkových homogenních nosníků (SM), kde byla průměrná maximální dosažená síla 10,56 kN. U homogenních bukových nosníků (BK) bylo dosaženo průměrné maximální síly 39,98 kN, hybridních bukovo-topolových (HYB) 38,68 kN. Největší deformace dosahovaly hybridní nosníky, a to v průměru

75,9 mm. Velké deformace dosahovaly rovněž homogenní bukové nosníky, a to průměrně 60,1 mm, nejmenší deformace 17,2 mm v průměru dosahovaly lamely smrkové.

Pevnost lepených lamelových nosníků v čtyřbodovém ohybu (experiment 3E)

Podle výsledků provedených zkoušek byla průměrná pevnost homogenních bukových nosníků v ohybu 89,1 N/mm², hybridních bukovoto-popolových nosníků 83,0 N/mm² a smrkových nosníků 23,8 N/mm². Zjištěná pevnost v čtyřbodovém ohybu je zobrazena v krabicovém grafu na Obr. 90.



Obr. 90 Výsledky experimentu 3E vyjádřené pomocí krabicového grafu; BK = homogenní bukové nosníky, HYB = hybridní bukovoto-popolové nosníky, SM = homogenní smrkové nosníky.

Výsledné hodnoty zjišťované pevnosti v ohybu jsou shrnuty v Tab. 41.

Tab. 41 Experiment 3E – pevnost lepených lamelových nosníků v ohybu.

	BK	HYB	SM
$f_{m,12}$ v N/mm ²	bukové homogenní LLD nosníky	hybridní bukovo- topolové LLD nosníky	smrkové homogenní LLD nosníky
průměr \bar{x}	89,1	83,0	23,8
medián \tilde{x}	93,0	83,4	24,3
směrodatná odchylka s	8,4	4,5	3,6

Jak je zřejmé z Tab. 41 experimentálně zjištěná pevnost v ohybu bukových homogenních nosníků je téměř srovnatelná s pevností v ohybu hybridních bukovoto-popolových nosníků.

Pevnost v ohybu smrkových nosníků naopak vycházela velice nízká. Smrkové nosníky však byly slepeny z lamel s velkým množstvím suků. Podle informací od výrobce byly pro výrobu smrkových LLD nosníků použity lamely, které výrobce standardně používá pro výrobu lepených nosníků, avšak standardní šířka nosníku bývá od cca 100 mm. Lamely se podle normy ČSN 73 2824-1 [95] třídí vizuálně také podle počtu a velikostí suků v poměru k šířce prkna.

Pro lamely o šířce 100 mm tedy mohly být lamely vyhovující, pro šířku lamely 60 mm s nestandardní výškou 20 mm však již mohl být počet a velikost suků nevyhovující.

Ve srovnání s lamelami, ze kterých byly lepené prvky vyrobeny (Tab. 35), mají bukové lepené nosníky nižší pevnost v ohybu, a to o 22 % (pevnost bukových lamel byla určena $113,4 \text{ N/mm}^2$), smrkové lepené nosníky mají oproti lamelám nižší pevnost v ohybu o 63 % (smrkové lamely měly pevnost $63,3 \text{ N/mm}^2$). Tento rozdíl může být způsoben vadami dřeva (zejména u smrku), soudržností lepených spar či rozdílem v rozměrech zkušebních těles (průřez LLD je 6× větší než průřez lamel). Podle [123] a [124] se pevnost prvků s rostoucími rozměry snižuje (tzv. *size effect*).

Smrkové lepené nosníky byly při zkouškách porušeny spíše lomem kolmým na podélnou osu prvku a tedy kolmým na směr vláken, někdy doprovázeným šikmou trhlinou nebo šikmými trhlinami orientovanými ve směru vláken. Charakter porušení smrkových homogenních nosníků je zobrazen na Obr. 91 a Obr. 92.



Obr. 91 Příklady porušení smrkového homogenního nosníku (SM) [archiv autora].



Obr. 92 Příklady porušení smrkového homogenního nosníku (SM) [archiv autora].

Porušení hybridních bukovo-topolových nosníků začínalo u většiny vzorků porušením lamel v tažené části průřezu (Obr. 93). U některých vzorků však došlo k porušení topolových lamel v jádře průřezu bez porušení bukových lamel v tažené části průřezu (Obr. 94).



Obr. 93 Příklady porušení hybridního bukovo-topolového nosníku (HYB) [archiv autora].



Obr. 94 Příklady porušení hybridního bukovo-topolového nosníku (HYB) [archiv autora].

Porušení bukových homogenních nosníků probíhalo u všech vzorků rozvojem trhlin v tažené části průřezu, někdy následovaným částečnou delaminací (Obr. 95 a Obr. 96).



Obr. 95 Příklady porušení homogenního bukového nosník (BK) chiv autora].



Obr. 96 Příklady porušení homogenního bukového nosníku (BK) [archiv autora].

Pro přibližné srovnání lze uvést tabulku převzatou z normy ČSN EN 14080 [55], která uvádí charakteristické pevnosti pro homogenní lepené lamelové dřevo (názvosloví viz kap. 2.3.3.1), označené písmenem h (Tab. 42).

Tab. 42 Charakteristická pevnost $f_{m,k}$ v N/mm^2 pro homogenní lepené lamelové dřevo [55].

třída pevnosti lepeného lamelového dřeva							
	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
pevnost v ohybu	20	22	24	26	28	30	32

Obdobnou tabulku s hodnotami pro bukové a hybridní lepené lamelové dřevo lze nalézt v [57] (Tab. 43 a Tab. 44), kde je homogenní LLD označené písmenem h, kombinované LLD písmenem c a hybridní LLD písmeny hyb (názvosloví viz kap. 2.3.3.1).

Tab. 43 Charakteristická pevnost $f_{m,k}$ v N/mm^2 pro bukové lepené lamelové dřevo [57].

třída pevnosti lepeného lamelového dřeva						
	GL 28h	GL 32c	GL 36c	GL 40c	GL 44c	GL 48c
pevnost v ohybu	28	32	36	40	44	48

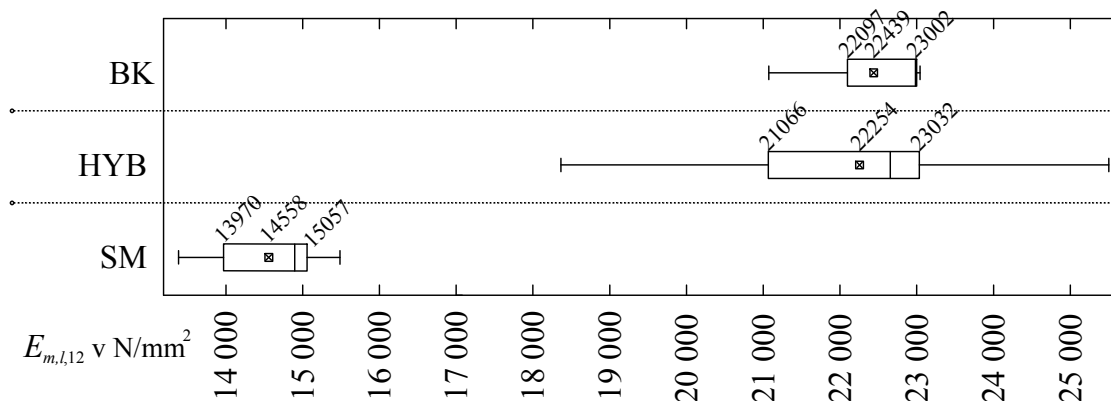
Tab. 44 Charakteristická pevnost $f_{m,k}$ v N/mm^2 pro bukové hybridní lepené lamelové nosníky [57].

třída pevnosti lepeného lamelového dřeva						
	GL 28 hyb	GL 32 hyb	GL 36 hyb	GL 40 hyb	GL 44 hyb	GL 48 hyb
pevnost v ohybu	28	32	36	40	44	48

Srovnání by bylo možno provést po určení charakteristických hodnot pevnosti, které by však vyžadovalo provést zkoušky s minimálně 40 zkušebními tělesy [110].

Modul pružnosti lepených lamelových nosníků ve čtyřbodovém ohybu (experiment 3F)

Podle výsledků provedených zkoušek byl průměrný modul pružnosti v ohybu homogenních bukových nosníků $22\,439\text{ N/mm}^2$, hybridních bukově-topolových nosníků $22\,254\text{ N/mm}^2$ a smrkových nosníků $14\,558\text{ N/mm}^2$. Výsledky zkoušky modulu pružnosti lepených lamelových nosníků ve čtyřbodovém ohybu jsou zobrazeny v grafu na Obr. 97.



Obr. 97 Výsledky testování modulu pružnosti ve čtyřbodovém ohybu lepených nosníků vyjádřené pomocí krabicového grafu; BK = homogenní bukové nosníky, HYB = hybridní bukově-topolové nosníky, SM = homogenní smrkové nosníky.

Výsledné hodnoty zjišťovaného modulu pružnosti v ohybu jsou shrnuty v Tab. 45.

Tab. 45 Experiment 3F –modul pružnosti lepených lamelových nosníků v ohybu.

	BK	HYB	SM
$E_{m,l,12}$ v N/mm^2	bukové homogenní LLD nosníky	hybridní bukovo- topolové LLD nosníky	smrkové homogenní LLD nosníky
průměr \bar{x}	22 439	22 253	14 558
medián \tilde{x}	22 984	22 656	14 896
směrodatná odchylka s	770	1885	768

Jak je zřejmé z Tab. 45 experimentálně zjištěný modul pružnosti v ohybu bukových homogenních nosníků je téměř srovnatelný s pevností v ohybu hybridních bukově-topolových nosníků. Ve srovnání s lamelami (Tab. 36), mají bukové lepené nosníky vyšší modul pružnosti v ohybu a to o 15 % (modul pružnosti v ohybu bukových lamel byla určena $19\,554\text{ N/mm}^2$). Modul pružnosti v ohybu smrkových nosníků naopak vycházel nižší, než jaký byl zjištěn u smrkových lamel, a to o 12 % (modul pružnosti v ohybu smrkových lamel byl určena $16\,504\text{ N/mm}^2$), a je samozřejmě nižší než modul pružnosti bukových homogenních a hybridních nosníků.

Pro přibližné srovnání lze uvést tabulku převzatou z normy ČSN EN 14080 [55], která uvádí průměrné hodnoty modulu pružnosti pro homogenní lepené lamelové dřevo (viz Tab. 46). Ve srovnání s touto tabulkou odpovídá hodnota určená v experimentu pro smrkové homogenní nosníky třídy GL 32. Označení mean je v [55] použito pro průměrnou hodnotu.

Tab. 46 Průměrná hodnota modulu pružnosti E_{mean} v N/mm^2 pro homogenní lepené lamelové dřevo [55].

třída pevnosti lepeného lamelového dřeva							
	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
modul pružnosti	8400	10500	11500	12000	12600	13600	14200

Obdobnou tabulku s hodnotami pro bukové a hybridní lepené lamelové dřevo lze nalézt v [57] (Tab. 47, Tab. 48). Označení mean je v [57] použito pro průměrnou hodnotu.

Tab. 47 Průměrná hodnota modulu pružnosti E_{mean} v N/mm^2 pro bukové lepené lamelové dřevo; h = homogenní, c = kombinované [57].

třída pevnosti lepeného lamelového dřeva						
	GL 28h	GL 32c	GL 36c	GL 40c	GL 44c	GL 48c
modul pružnosti	13500	13500	13500	14300	15100	15100

Tab. 48 Průměrná hodnota modulu pružnosti E_{mean} v N/mm^2 pro bukové hybridní lepené lamelové nosníky [57].

třída pevnosti lepeného lamelového dřeva						
	GL 28 hyb	GL 32 hyb	GL 36 hyb	GL 40 hyb	GL 44 hyb	GL 48 hyb
modul pružnosti	13200	13200	13200	14000	14700	14700

Moduly pružnosti uvedené v [57] (Tab. 47 a Tab. 48) jsou pro všechny třídy pevnosti nižší než hodnoty zjištěné při experimentu.

6 ZÁVĚRY PRO PRAXI

6.1 Vymezení oblasti klimatolerantních dřevin aplikovatelných v konstrukcích pozemních staveb

Jako klimatolerantní dřeviny byly v této práci označeny dřeviny, jejichž pěstování ve střední Evropě bude dlouhodobě udržitelné a jež mají významný podíl v zastoupení v doporučené skladbě lesa ČR. Z daného souboru potom byly vybrány pouze ty dřeviny, které mají z hlediska svých fyzikálních a mechanických vlastností dobré předpoklady pro použití v nosných konstrukcích pozemních staveb.

Klimatolerantní dřeviny aplikovatelné v konstrukcích pozemních staveb tedy jsou:

- buk (*Fagus sylvatica*),
- dub (*Quercus*),
- javor (*Acer*) a
- habr (*Carpinus betulus*).

6.2 Ověření vlastností konkrétního listnatého dřeva

6.2.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost všech dřevin zjišťovaná v jednotlivých experimentech včetně srovnání s hodnotami uváděnými v odborné literatuře byla shrnuta v Tab. 49 a Tab. 50. Objemová hmotnost byla určována pro vlhkosti $\omega = 12\%$ a $\omega = 0\%$, srovnání bylo provedeno podle toho, která hodnota je v které literatuře uvedena. Z literatury [33] byly do srovnání vybrány nejbližší příbuzné druhy: ^{*1}buk velkolistý (*Fagus grandifolia*), ^{*2}dub červený (*Quercus rubra*), ^{*3}javor velkolistý (*Acer Macrophyllum*).

Tab. 49 Shrnutí všech hodnot objemových hmotností jednotlivých dřevin zjištěných při jednotlivých experimentech pro $\omega = 12\%$ a jejich porovnání s hodnotami uvedenými v odborné literatuře.

objemová hmotnost ρ v kg/m^3 pro $\omega = 12\%$	buk	dub	habr	javor	smrk	topol
experiment 1A (kap. 5.2.1)	682	687	734	616	–	–
experiment 2 (kap. 5.4)	709	–	–	–	–	–
experiment 3A (kap. 5.5.2.1)	727	–	–	–	454	394
podle [33]	640 ^{*1}	610 ^{*2}	–	480 ^{*3}	440	–

Tab. 50 Shrnutí všech hodnot objemových hmotností jednotlivých dřevin zjištěných při jednotlivých experimentech pro $\omega = 0 \%$ a jejich porovnání s hodnotami uvedenými v odborné literatuře.

objemová hmotnost ρ v kg/m^3 pro $\omega = 0 \%$	buk	dub	habr	javor	smrk	topol
experiment 1A (kap. 5.2.1)	620	624	667	556	–	–
experiment 2 (kap. 5.4)	640	–	–	–	–	–
experiment 3A (kap. 5.5.2.1)	664	–	–	–	409	356
podle [108]	680	650	–	–	430	–
podle [9]	684	696	697	526	392	324–395
podle [28]	680	650	790	620	430	350–410

Experimentálně zjištěné hodnoty objemové hmotnosti buku byly vyšší, než hodnota uváděná v odborné literatuře [108], [9], a [28]. Pouze hodnota uváděná v [33] je nižší, ale jedná se v tomto případě jen o orientační srovnání, protože se jedná o jiný druh buku. Objemová hmotnost dubu, habru a javoru byla určována pouze v prvním experimentu, u dubu a habru byla opět zjištěna vyšší hodnota, než uvádí odborná literatura, u javoru byla experimentální hodnota mírně vyšší. Objemová hmotnost smrku a topolu byla zjišťována pouze v posledním experimentu a pohybovala se v rozmezí udávaném odbornou literaturou.

Odchytky nejen mezi experimenty a literaturou, ale i mezi jednotlivými experimenty a rovněž mezi jednotlivými literaturami, mohou být způsobeny mnoha faktory. Jedná se o stanoviště růstu, šířku letokruhů a podíl letního dřeva, polohu v kmeni a věk stromu. Hodnoty uváděné v odborné literatuře lze tedy uvažovat pouze orientačně.

6.2.2 Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu všech dřevin zjišťovaná v jednotlivých experimentech včetně srovnání s hodnotami uváděnými v odborné literatuře je shrnuta v Tab. 51. Hodnoty z [28] byla přepočtena na 12% vlhkost z hodnoty pro 15% vlhkost podle vztahu (12). Z literatury [33] byly do srovnání vybrány nejbližší příbuzné druhy: ^{*1}buk velkolistý (*Fagus grandifolia*), ^{*2}dub červený (*Quercus rubra*), ^{*3}javor velkolistý (*Acer Macrophyllum*).

Pevnost v ohybu buku zjištěná v jednotlivých experimentech je přibližně srovnatelná, pohybuje se v rozmezí hodnot udávaných v odborné literatuře, nejvíce je blízká hodnotě, kterou udává [28]. Pevnost v ohybu dubu zjištěná v experimentech byla v rozmezí hodnot uvedených v odborné literatuře. Hodnoty habru a dubu jsou nižší, než udává odborná literatura kromě [33], která udává výrazně nižší hodnotu, než ostatní literatury a nižší hodnota z experimentu. Hodnoty smrku odpovídají literatuře, ale hodnoty topolu zjištěné experimentálně jsou mírně vyšší, než udává literatura.

Tab. 51 Shrnutí všech hodnot pevností v ohybu jednotlivých dřevin zjištěných při jednotlivých experimentech a jejich porovnání s hodnotami uvedenými v odborné literatuře.

$f_{m,12}$ v N/mm ²	buk	dub	habr	javor	smrk	topol
experiment 1B (kap. 5.2.2)	108,4	91,7	101,7	94,1	–	–
experiment 2B (kap. 5.4.1)	106,8	–	–	–	–	–
experiment 3B (kap. 5.5.2.1)	113,4				63,3	62,9
podle [9]	124	85,2	130,7	114	R 70,4 T 72,9	46,0– 50,3
podle [28]	115	97	143	129	57,1	46,1– 60,4
Podle [108]	123	110	–	–	78	–
podle [33]	103 ^{*1}	96 ^{*2}	–	74 ^{*3}	72,0	–

Nejvyšší pevnost v ohybu má buk, po němž následuje habr, javor a dub. Smrk a topol mají pevnost v ohybu srovnatelnou a přibližně 60% oproti předchozím druhům dřeva.

6.2.3 Modul pružnosti v ohybu

Hodnoty modul pružnosti v ohybu všech dřevin zjištěné v jednotlivých experimentech včetně srovnání s hodnotami uváděnými v odborné literatuře je shrnut v Tab. 52. Z literatury [33] byly do srovnání vybrány nejbližší příbuzné druhy: ^{*1}buk velkolistý (*Fagus grandifolia*), ^{*2}dub červený (*Quercus rubra*), ^{*3}javor velkolistý (*Acer Macrophyllum*).

Tab. 52 Shrnutí všech hodnot modulu pružnosti v ohybu jednotlivých dřevin zjištěných při jednotlivých experimentech a jejich porovnání s hodnotami uvedenými v odborné literatuře.

$E_{m,l}$ v N/mm ²	buk	dub	habr	javor	smrk	topol
experiment 1C (kap. 5.2.3)	19 947	18155	17925	13996	–	–
experiment 3C (kap. 5.5.2.2)	19 554	–	–	–	16 504	12 780
podle [9]	12 966	–	13 417	9 582	8948	5 405–6 300
podle [28]	16 495	12 100	16 700	11 650	–	7 383–9 203
podle [108]	16 000	13 000	–	–	–	–
podle [33]	11900 ^{*1}	11300 ^{*2}	–	10000 ^{*3}	8500	–

Je zřejmé, že modul pružnosti buku je v experimentech přibližně srovnatelný, modul pružnosti ostatních dřevin nelze mezi experimenty porovnat, protože nebyl prováděn pro stejné dřeviny. Obecně moduly pružnosti zjištěné v experimentech byly vyšší, než hodnoty uváděné v odborné literatuře.

6.2.4 Pevnost v tlaku

Hodnoty pevnosti v tlaku byly zjišťovány pouze v experimentu 1D, srovnání a porovnání s literaturou je uvedeno v kap. 5.2.4. Hodnoty pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny získané experimentem 1D přibližně odpovídají hodnotám uváděných v odborné literatuře, nejvyšší pevnost v tlaku vykazuje habr a buk.

6.3 Analýza nejvhodnější dřeviny pro použití v nosných konstrukcích pozemních staveb

Podle výsledků hodnocení podrobně popsanych v kap. 5.3.2 byl jako nejvýhodnější dřevina pro použití v nosných konstrukcích pozemních staveb vyhodnocen buk, nejméně výhodné je pak použití habru. Dub a javor obsadily druhé a třetí místo, přičemž jejich přesné umístění se mění v závislosti na modifikaci hodnocení.

Je zřejmé, že bukové dřevo má pro použití v nosných konstrukcích pozemních staveb velký potenciál. Má výborné mechanické vlastnosti, které dalece předčí vlastnosti dosud používaného dřeva smrkového. Snížení jeho ceny se očekává v souvislosti s růstem jeho porostní plochy, přičemž naopak cena smrkového dřeva bude narůstat.

Již dnes mají podle [125] pilařské závody problém sehnat smrkové dřevo ve svém okolí a potřebný objem jsou nuceni dovážet při zvýšených přepravních nákladech. Zamýšlejí se nad tím, zda se v budoucnu budou orientovat na pořez rychle rostoucích dřevin jako je bříza nebo topol, nebo upraví technologii výroby tak, aby mohli standardně nabízet bukové a dubové řezivo [125].

6.4 Experimentální ověření funkčnosti geometrie zubovitého spoje

Zubovitý spoj byl proveden v bukových lamelách délkou ozubu 23 mm s použitím PUR lepidla.

Výsledky experimentu ukazují, že pevnost v ohybu spojených lamel dosahuje pouze 65 % pevnosti lamel nespojených. Výsledky tedy ověřily a potvrdily závěry z literatury [62], která uvádí, že spoj o délce zubů do 30 mm není pro bukové řezivo dostatečný. Tento spoj není možné použít při výrobě nosných konstrukčních lepených bukových prvků.

Návrh funkční geometrie zubovitého spoje pro bukové dřevo uvádí [62], a to pro ležatý spoj spojený MUF lepidlem. Jak je uvedeno v kap. 7.1, bylo by vhodné geometrii spoje navrženou v [62] ověřit i pro stojatý spoj, PUR či jiné lepidlo, případně navrhnout úpravu této geometrie.

6.5 Návrh lepeného prvku

Na základě všech zjištěných informací z odborné literatury, provedených experimentů a matematické analýzy, byl navržen homogenní lepený lamelový nosník z bukového dřeva. Dále byl navržen vylehčený hybridní bukovo-topolový lepený lamelový nosník. Tyto nosníky byly podrobeny zkouškám pevnosti a modulu pružnosti v ohybu.

Objemová hmotnost hybridních bukovo-topolových nosníků je podle výsledků experimentu 3D ve srovnání s homogenními bukovými nosníky přibližně o čtvrtinu menší, objemová hmotnost smrkových nosníků je pak oproti bukovým téměř poloviční. Hybridní nosníky mají oproti smrkovým objemovou hmotnost vyšší přibližně o 37 %. Objemová hmotnost všech lepených nosníků je srovnatelná až mírně nižší než objemová hmotnost lamel, ze kterých je vyroben (experiment 3A).

Ve srovnání s tabulkou převzatou z normy [55] odpovídá objemová hmotnost smrkových homogenních LLD nosníků (SM) určená v experimentu 3D tříde GL 26. Objemová hmotnost homogenních i hybridních nosníků zjištěná v experimentu 3D byla vyšší než hodnota uvedená v [57].

Experimentálně zjištěná pevnost v ohybu bukových homogenních nosníků (experiment 3E) je téměř srovnatelná s pevností v ohybu hybridních bukovo-topolových nosníků. Pevnost v ohybu smrkových nosníků naopak vycházela velice nízká, což bylo způsobeno pravděpodobně velkým množstvím suků. Ve srovnání s lamelami, ze kterých byly lepené prvky vyrobeny (experiment 3B), mají bukové lepené nosníky nižší pevnost v ohybu, a to o 22 %, což lze přisuzovat zejména vlivu velikosti prvků (tzv. *size effect*). Srovnání s hodnotami uvedenými v [55] a [57] nebylo možno provést, neboť nebyly určovány charakteristické hodnoty pevnosti, které tato literatura uvádí.

Experimentálně zjištěný modul pružnosti v ohybu bukových homogenních nosníků (experiment 3F) je téměř srovnatelný s modulem pružnosti v ohybu hybridních bukovo-topolových nosníků. Ve srovnání s lamelami (experiment 3C), mají bukové lepené nosníky vyšší modul pružnosti v ohybu a to o 15 %. Modul pružnosti v ohybu smrkových nosníků

naopak vycházel nižší, než jaký byl zjištěn u smrkových lamel, a to o 12 % (vliv suků), a je samozřejmě nižší než modul pružnosti bukových homogenních a hybridních nosníků.

Ke srovnání s hodnotami pro lamely je nutné ještě uvést, že zkoušky lamel byly prováděny na vzorcích bez suků a vad, tedy na idealizovaných tělesech.

Ve srovnání s tabulkou z normy [55] odpovídá modul pružnosti určený v experimentu 3F pro smrkové homogenní nosníky třídy GL 32. Při srovnání modulů pružnosti homogenních bukových a hybridních bukovo-topolových nosníků jsou moduly pružnosti uvedené v [57] pro všechny třídy pevnosti nižší než hodnoty zjištěné při experimentu, a to o 37 % v případě bukových homogenních nosníků (pro GL 32h) a o 32 % u hybridních nosníků (pro GL 48c).

Výsledky zkoušek lepených lamelových nosníků ukazují, že je možné v jednom průřezu úspěšně kombinovat různé druhy listnatého dřeva, přičemž při zkouškách hybridních bukovo-topolových nosníků se ukázalo, že použití topolových lamel ve vnitřní zóně lamel s mnohem nižší pevností oproti lamelám ve vnější zóně (bukové lamely měly ve srovnání s topolovými podle výsledků experimentu o 80 % vyšší pevnost), nemělo zásadní vliv na pevnost nosníku ani na jeho modul pružnosti. Obě tyto sledované hodnoty byly u obou typů nosníku téměř srovnatelné. Jak lze sledovat na Obr. 89, do dosažení přibližně poloviny F_{\max} , byl průběh pracovního diagramu pro homogenní i hybridní prvky velmi podobný. Rozdíl nastával při dalším zvětšování zatížení, kdy hybridní nosníky vykazovaly větší deformaci než nosníky homogenní a konečná deformace u nich byla větší.

Smrkové nosníky vykazovaly díky množství vad dřeva hodnoty pevnosti velice nízké, proto se nedaly jako referenční použít.

6.6 Shrnutí

Použití listnatého dřeva ve formě lepených nosníků v konstrukcích pozemních staveb je nejen možné, ale rovněž velmi vhodné. Návrhem lepeného nosníku lze eliminovat negativní vlastnosti rostlého dřeva, návrhem kombinace lamel různých dřevin lze nosník vylehčit při pouze mírném zhoršení mechanických vlastností.

Výrobou lepených nosníků z jiných dřevin než u doposud používaných prvků, představuje nové možnosti v jejich využívání. Užitím dřevin s kvalitnějšími mechanickými a fyzikálními parametry je možné dosáhnout větších rozponů nosníků za použití stejných průřezů nosníků. Opačným případem je samozřejmě užití nižších a subtilnějších průřezů pro překonání stejné vzdálenosti jako u nosníků ze smrkového dřeva. Z hlediska struktury a stavby listnatých dřevin,

jako je dub či buk, v kombinaci s technologií výroby lepených nosníků za působení tlaku je možné dosáhnout podstatně vyšších charakteristik požárně bezpečnostní odolnosti nosníku.

Při srovnání hybridních lepených lamelových prvků v kombinaci listnatých dřevin s v současnosti používaným lepeným smrkovým nosníkem běžné pevnosti GL 24h je podle dostupných výsledků možné předpokládat:

- zvýšení pevnosti v ohybu o 60–70 %,
- snížení výšky prvku při standardním rozpětí 4,5 m o 10–20 %,
- zvětšení standardního přeneseného rozpětí při stejném průřezu stropních nosníků o 15–20 %.

Tyto hodnoty však závisí na konkrétních rozměrech posuzovaných prvků, předběžně určeny byly pro průřezy 60/240 a 100/300 mm a rozpětí 4,5 a 4,7 m.

Lepený lamelový prvek z kombinace listnatých dřevin umožní plnohodnotné zastoupení smrkového řeziva, které bude v blízké době nedostatkovým materiálem. Vzhledem k současnému stavu českých lesů a jejich nutnému vytěžování bude v následujících letech cena smrkového řeziva narůstat. V současné době se cena běžného smrkového řeziva pohybuje okolo 5 tis. Kč za m³. Ceny lepených nosníků z jehličnatého dřeva se pak pohybují okolo 10 až 14 tis. Kč za m³. Ceny jsou pouze orientační a odvíjí se také od velikosti požadovaného prvku, přičemž s rostoucími dimenzemi cena prvků zásadně narůstá.

V případě lepených listnatých nosníků se v současné době předpokládá mírné navýšení ceny kvůli užití kvalitnější vstupní suroviny, náročnějšímu způsobu zpracování listnatých dřevin a nutnosti používání kvalitnějších a odolnějších zařízení. V budoucnosti při zavedení sériové výroby těchto prvků, při snížení ceny vstupní suroviny a použití cenově ještě dostupnější suroviny v jádře průřezu však lze předpokládat cenu lepeného prvku srovnatelnou se současnými prvky smrkovými, a to rovněž s ohledem na snížení dimenze a kubatury pro přenesení standardního rozpětí.

Výroba a používání lepených nosníků z listnatých dřevin bude však možná až po zavedení příslušné legislativy. Tento krok však nelze podle [53] provést přes noc, je třeba dalších projektů založených na analýzách a výzkumu dříve převážně teoretické práce. Řešení by mělo být vyvíjeno ve spolupráci všech oborů – lesnictví, dřevařského a pilařského průmyslu a politiky, kdy každá z těchto oblastí by měla provést změny ve svém oboru [53].

7 MOŽNOSTI DALŠÍHO VÝZKUMU

7.1 Rozšíření výzkumu zubovitých spojů

Funkčnost zubovitých spojů závisí na celé řadě faktorů. Experimentálními zkouškami byl v rámci disertační práce ověřen pouze zubovitý spoj o jedné délce ozubů (tedy jedné geometrii), za použití jednoho lepidla, lisovacího tlaku apod. Pro získání uceleného obrazu by bylo vhodné provést další zkoušky, nejlépe s využitím průmyslově vyráběných zubovitých spojů, aby se tak eliminovaly možné chyby výroby v laboratoři.

Zejména by bylo vhodné provést experimentální zkoušky:

- s použitím jiných geometrií zubovitého spoje, nejen délky ozubu 30 mm, jak vyplývá ze studie [62], případně více, ale např. i s jinou roztečí,
- s použitím dalších lepidel, např. MUF, epoxid, EPA,
- s větším počtem vzorků tak, aby bylo možno určit charakteristické hodnoty zjišťovaných pevností,
- nosníků ze 2-3 lamel se zubovitým spojem (DUO/TRIO nosníky),
- delaminace pro zubovitého spoje v lamelách – tato zkouška je popsána v příloze B.3 normy ČSN EN 14080 [55], pouze by bylo nutné nereflektovat podmínku, že se pro výrobu spojů musí použít smrkové dřevo.

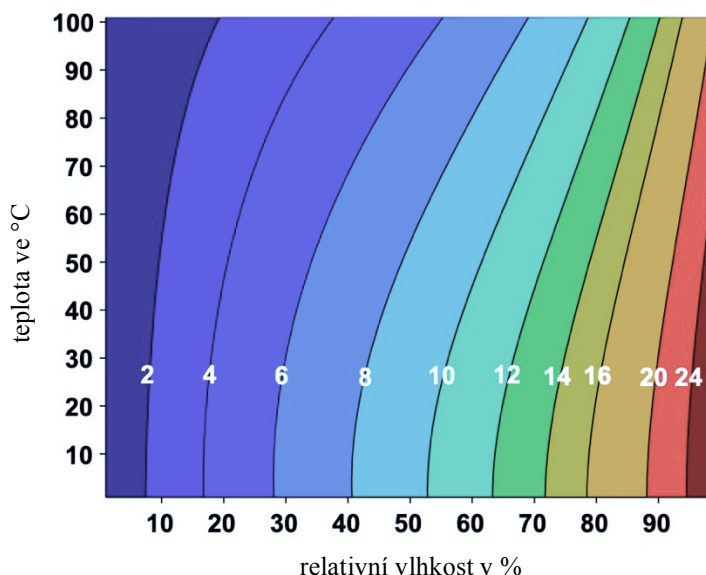
Kromě experimentálních zkoušek by bylo rovněž vhodné provést numerické simulace zatěžování lamel spojovaných zubovitým spojem, což by umožnilo eliminovat množství experimentálně zkoušených variant.

7.2 Rozšíření výzkumu lepených lamelových prvků z listnatého dřeva

Zkoušky lepených lamelových prvků byly vzhledem k možnostem výroby provedeny na omezeném počtu prvků. Zkoušky by bylo vhodné rozšířit zejména o:

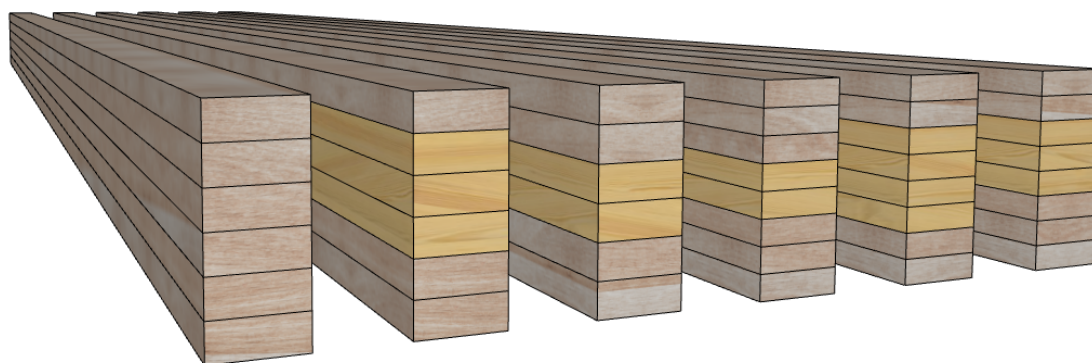
- zkoušky delaminace lepených spár, provádění této zkoušky je popsáno v příloze C normy ČSN EN 14080 [55], případně smyková zkouška lepených spar, provádění je popsáno v příloze D normy [55],
- zkoušky zaměřené na lepení dřevin s rozdílným modulem pružnosti a chování této lepené spáry při ohybu,

- zkoušky vlhkostní stability – rozměrové nestálosti v kombinaci materiálů při kolísání vlhkosti, jelikož každá z použitých dřevin (buk, topol) má jiné hodnoty sesychání/bobtnání, a tento rozdíl může způsobit při změnách vlhkosti prostředí vznik vnitřního napětí v prvku a následné porušení lepených spar. Předpokládá se však použití těchto nosníků pouze pro třídu provozu 1, uvažuje se tedy kolísání vlhkosti dřeva přibližně mezi 8–12 % (Obr. 98).



Obr. 98 Vlhkost dřeva jako funkce relativní vlhkosti vzduchu a teploty [33].

- větší množství zkoušených prvků pro možnost určení charakteristických hodnot a pro lepší možnost srovnání, kdy podle [110] je pro dřevěné prvky potřeba zkoušet minimální počet 40 vzorků,
- zkoušky prvků s jiným složením lamel v průřezu, případně jinou tloušťkou lamel,



Obr. 99 Možné varianty složení průřezu hybridních lepených prvků [archiv autora].

- zkoušky full-scale vzorků (vyloučení size effectu),
- zkoušky profilů různých průřezů a určení koeficientu vlivu velikosti vzorku, jako např. pro modřínové lepené nosníky určuje literatura [124],

- zkoušky masivních prvků o stejných rozměrech jako jsou lepené prvky pro lepší srovnání,
- zkoušky na tlak a vzpěr – pro použití prvků jako sloupy,
- výzkum zakřivených nosníků pro stropní a střešní konstrukce.

Téma listnatých dřevin a lepených nosníků z nich, zejména z buku, je velmi široké a skýtá celou škálu možností zkoumání a rozvoje základních teoretických poznatků. Toto téma je velmi perspektivní a navržené nosníky mají potenciál stát se vysoce funkčním stavebním prvkem budoucnosti.

Použitá literatura

- [1] STRAKA, B., ŠMAK, M., VANĚREK, J., KOTÁSKOVÁ, P. Dřevo v historických konstrukcích [online]. In tzb-info, 16. 7. 2019 [cit. 28. 2. 2020]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/historicke-stavby/17637-drevo-v-historickych-konstrukcich>
- [2] STRAKA, B., NOVOTNÝ, M., PEXOVÁ, J., ŠMAK, M., ŠUHAJDA, K., VEJPUSTEK, Z., Konstrukce šikmých střech. Grada Publishing, a.s., Praha, 2013, 230 pp. ISBN: 978-80-247-4205-2
- [3] PODRÁZSKÝ, V.; KOUBA, J.; ZAHRADNÍK, D.; ŠTEFANČÍK, I. Změny v druhové skladbě českých lesů [online]. Seminář Dřevostavby Volyně 2013, 3.6.2013. [cit.10.2.2016] Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/9980-zmeny-v-druhove-skladbe-ceskych-lesu>
- [4] Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2017 [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství v nakladatelství Lesnická práce, 2017. ISBN 978-80-7434-477-0 [cit. 30. 1. 2020] Dostupné také z: http://www.uhul.cz/images/ke_stazeni/zelenazprava/ZZ_2017.pdf
- [5] Zpráva o životním prostředí České republiky: Druhová a věková skladba lesů. Cenia. [Online] 16. 9. 2013. [Citace: 20. 6. 2014.] <http://issar.cenia.cz/issar/page.php?id=1942>
- [6] KŘENKOVÁ, K. Výzkumníci chtějí vylepšit dřevo, aby předčilo plasty. Zaměří se na buk. MF Dnes. [Online] 11. 6 2015. [Citace: 20. 4 2016.] http://brno.idnes.cz/vyzkumne-centrum-josefa-ressela-brno-utechov-drevo-strom-buk-p61-/brno-zpravy.aspx?c=A150709_2175979_brno-zpravy_vh
- [7] KUKLÍK, P. Dřevěné konstrukce. Praha : ČKAIT, 2005. str. 140. ISBN 80-01-01748-6
- [8] PAVLÍKOVÁ, M., KEPPERT, M. Chemie, chemie stavebních materiálů. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2009. str. 195. ISBN 978-80-01-04237-3
- [9] POŽGAJ, A.; CHOVANEC, D.; KURJATKO, S.; BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava, Příroda, 1997. 485 s. ISBN 8007009604
- [10] PODRÁZSKÝ, V. Lesnictví na rozcestí nebo na scestí. Vesmir.cz. [Online] 2009. <http://casopis.vesmir.cz/clanek/lesnictvi-na-rozcesti-nebo-na-scesti>.
- [11] Indikátory zprávy o životním prostředí ČR, Lesy, Druhová a věková skladba lesů [online]. Informační systém statistiky a reportingu, Ministerstvo životního prostředí. [cit. 30. 1. 2020] Dostupné také z: <https://issar.cenia.cz/prehled-klicovych-indikatoru-podle-hlavnich-temat/05-lesy/02-druhova-a-vekova-skladba-lesu/>
- [12] Statistická ročenka životního prostředí České republiky 2017. Cenia, česká informační agentura životního prostředí, Ministerstvo životního prostředí. ISBN 978-80-87770-66-5. Dostupné také z: <https://www.cenia.cz/publikace/statisticka-rocenka-zivotniho-prostredi-cr/statisticka-rocenka-zivotniho-prostredi-2017/>
- [13] CIKÁNKOVÁ, J.; KOBLÍŽKOVÁ, E.; MERTL, J.; POKORNÝ J.; PONOCNÁ, T.; ROLLEROVÁ, M.; VLČKOVÁ, V. Zpráva o životním prostředí České republiky 2014. Ministerstvo životního prostředí. Cenia, 2015.
- [14] ČAPKA, R. Dřevozpracující průmysl v Německu stojí před velkými výzvami. Drevársky magazín, informační servis. [Online] 10. 5 2015. [Citace: 21. 4 2016.] <http://www.drevmag.com/cs/archiv/archiv-clanku-z-roku-2015/3558-drevozpracujici-prumysl-v-nemecku-stoji-pred-velkymi-vyzvami>
- [15] NÈGRE, F. Evropská unie a lesy [online]. Evropský parlament: Fakta a čísla o Evropské unii. 05/2019 [cit. 30. 1. 2020] Dostupné z: <http://www.europarl.europa.eu/factsheets/cs/sheet/105/evropska-unie-a-lesy>

- [16] WALKER, A. Dřevo – velká encyklopedie. Praha 2009, Grada Publishing, 192 s. ISBN: 978-80-247-2858-2.
- [17] SVOBODA, L. a kol. Stavební hmoty. Praha: Jaga group, s.r.o. 2005. 950 stran. ISBN 80-8076-007-1.
- [18] KOLÁŘ, K., REITERMAN, P. Stavební materiály: pro SPŠ stavební. Praha: Grada, 2012. Studium (Grada). ISBN 978-80-247-4070-6
- [19] KUKLÍK, P. Dřevěné konstrukce I. Praha : ČVUT, 1999
- [20] KUKLÍK, P. Dřevěné konstrukce. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Technická knihovna. 171 s. ISBN 80-86769-72-0
- [21] Charakteristiky dřevin [online]. Dřevocentrum – komplexní informace o dřevě a jeho použití. [cit. 24. 5. 2014]. Dostupné z: <http://drevo.celyden.cz/charakteristiky-drevin/>
- [22] WERTHANOVÁ, M. Atlas makrostruktury dřeva exotických dřevin, diplomová práce [online]. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta výrobních technologií a managementu. Část Chemické složení dřeva [cit. 28. 5. 2014]. Dostupné z: http://www.atlasdrevu.hu.cz/makro_exoticke/teorie_chemicke_slozeni_dreva_.html
- [23] ADÁMEK, J., NOVOTNÝ, B., KOUKAL, J. Stavební materiály. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 1997. ISBN 80-214-0631-3
- [24] Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Laboratorní práce „Makroskopická stavba dřeva“ [online] Výukové materiály, Vysoká škola chemicko-technologická, Praha. [cit. 23. 6. 2014] Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_makroskopicka_stavba_dreva/
- [25] WAGENFÜHR, Rudi. Anatomie des Holzes: unter besonderer Berücksichtigung der Holztechnik. 4., neubearbeitete Aufl. Leipzig: Fachbuchverlag, 1989. ISBN 3-343-00455-3.
- [26] JOSTEN, E., REICHE, T., BERND W. Dřevo a jeho obrábění, Průvodce truhláře. Praha: Grada Publishing, a.s. 2010. 336 s. ISBN 978-80-247-2961-9
- [27] BALABÁN, K. Nauka o dřevě, 1. vyd., 1. část Anatomie dřeva. Praha: Státní zemědělské nakladatelství. 1955. 216 s.
- [28] LEXA, Jaroslav. Mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva. Bratislava: Práca, 1952. Technologie dřeva.
- [29] ZEIDLER, A., BÖHM, M.: Mikroskopický atlas dřevin [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská. 2007. [cit. 23. 6. 2014] Dostupné z: http://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/atlas_drev/
- [30] Stavba dřeva a chemické složení dřeva [online] [cit. 23. 6. 2014] Dostupné z: <http://www.ohybacidrevo.cz/vlastnosti/chemicke-slozeni-dreva> a <http://www.ohybacidrevo.cz/vlastnosti/stavba-dreva>
- [31] Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Laboratorní práce „Mikroskopická stavba dřeva“ [online] Vysoká škola chemicko-technologická, Praha. [cit. 23.6.2016] Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_mikroskopicka_stavba_dreva/index.htm
- [32] ČSN EN 844-4 Kulatina a řezivo - Terminologie - Část 4: Termíny pro vlhkost. Praha: Český normalizační institut. 6.1998
- [33] Wood handbook – Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory, 2010. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 508 p.
- [34] HLADÍK, P. Historický vývoj použití dřeva v konstrukcích, bakalářská práce. [online] Brno, 2007. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. [cit:20.4.2016] Dostupné z:

http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=19263;jazyk_zalozka=1;lang=cz

- [35] ŠTĚPÁNEK, L. Polabské lidové stavby. V časopise: Vlastivědný zpravodaj Polabí 16. Polabské muzeum v Poděbradech, Poděbrady, 1976. ISSN 0231-5769
- [36] VAŘEKA, J., FROLEC, V. Lidová architektura: encyklopedie. Grada Publishing, a.s., Praha, 428 stran, 2. přepracované vydání, nakladatelství Grada Publishing, a.s., první vydání, Praha 2007, ISBN 978-80-247-1204-8
- [37] ŽÁK, P. Dřevo jako nejpůvodnější konstrukční materiál objektů muzea vesnice jihovýchodní Moravy a jeho ochrana, bakalářská práce. [online] Brno, 2008. Filozofická fakulta Masarykovy univerzity v Brně, Ústav archeologie a muzeologie. Vedoucí práce: Mgr. Pavel Holman. [cit. 20.4.2016] Dostupné z: https://is.muni.cz/th/111059/ff_b/
- [38] ČERNÁNSKÝ, M. Skanzen Rymice u Holešova, Muzeum Kroměřížska a lidové stavby. [online] Lidová architektura, 2000-2013. [cit. 20.4.2016] Dostupné z: <http://www.lidova-architektura.cz/ochrana-pamatky/muzea-skanzeny/rymice-muzeum-skanzen.htm>
- [39] ČERNÁNSKÝ, M. Moravské Kopanice, Areál staveb z moravských Kopanic. [online] Lidová architektura, 2000-2013. [cit. 20.4.2016] Dostupné z: <http://www.lidova-architektura.cz/ochrana-pamatky/muzea-skanzeny/straznice-stavby-kopanice.htm>
- [40] FOŘTOVÁ, K. Sanace historických objektů, Základové konstrukce. [online] ČVUT v Praze, fakulta stavební, katedra konstrukcí pozemních staveb, 2011. [cit. 20.4.2016] Dostupné z: <http://case-studies.webnode.cz/historicke-konstrukce/zakladani/>
- [41] Minaret v Lednici. [online] [cit. 20.4.2016] Dostupné z: <http://rozhledny.webzdarma.cz/minaret.htm>
- [42] BEČKOVSKÝ, D., VLACH, F., VITÍK, J., ŠUHAJDOVÁ, E. Mold Growth Risk Analysis on the Surfaces of an Organic Building Structure Based on In Situ Monitoring. Applied Mechanics and Materials. 2016, 824, 235-242. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.824.235. ISSN 1662-7482. Dostupné také z: <https://www.scientific.net/AMM.824.235>
- [43] AKRAMI, A., BARBU M. C., FRUEHWALD, A. Characterization of properties of oriented strand boards from beech and poplar. European Journal of Wood and Wood Products. 2014, 72(3), 393-398. DOI: 10.1007/s00107-014-0793-9. ISSN 0018-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00107-014-0793-9>
- [44] AKRAMI, A., FRÜHWALD, A., BARBU, M. C. Supplementing pine with European beech and poplar in oriented strand boards. Wood Material Science & Engineering. 2014, 10(4), 313-318. DOI: 10.1080/17480272.2014.942880. ISSN 1748-0272. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17480272.2014.942880>
- [45] BECK, K., CLOUTIER, A., SALENKOVICH, A., BEAUREGARD, R. Effect of strand geometry and wood species on strandboard mechanical properties. Wood and Fiber Science 2009 41(3):267-278 Dostupné z: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1325/1325>
- [46] KILIC, M., CELEBI, G. Compression, Cleavage, and Shear Resistance of Composite Construction Materials Produced from Softwoods and Hardwoods. Wiley InterScience 102: 3673-3678, 2006. DOI 10.1002/app.24153
- [47] NGUYEN, HH, GILBERT, BP, MCGAVIN, RL, BAILLERES, H. Optimisation of cross-banded laminated veneer lumbers manufactured from blending hardwood and softwood veneers. Eur J Wood Wood Prod 2019;77(5):783-797. ISSN: 00183768. DOI: 10.1007/s00107-019-01434-7
- [48] PURBA CYC, POT G, VIGUIER J, RUELLE J, DENAUD L. The influence of veneer thickness and knot proportion on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) made from secondary quality hardwood. Eur J Wood Wood Prod 2019. ISSN: 00183768. DOI: 10.1007/s00107-019-01400-3

- [49] HOUŠKA, P. Íčka vítězí nad masivem [online]. Dřevo a stavby, 2. 7. 2013 [cit 6. 2. 2020] Dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/konstrukce-drevostaveb/2268-icka-vitezi-na-masivem>
- [50] Lignotrend . Návrh dřevěných konstrukcí. [online] Webové stránky firmy Lignotrend Produktions GmbH, Weilheim-Bannholz, [cit. 6. 2. 2020] Dostupné z: <https://www.lignotrend.de/produkte/einzelnelemente/e03-ligno-rippe-q3/>
- [51] KANÓCZ, J., BAJZECEROVÁ, V. Parametrical Analysis of Long-Term Behaviour of Timber – Concrete Composite Bended Elements. Wood Research. Bratislava: State Forest Products Research Institute, 2014, 59(3), 379-388. ISSN 1336-4561.
- [52] KANÓCZ, J., BAJZECEROVÁ, V. Analysis of Composite Action of Various Mass Timber Structural Panels with Concrete Layer. Wood Research. Bratislava: State Forest Products Research Institute, 2018, 63(6), 1091-110 0. ISSN 1336-4561.
- [53] KRACKLER, V., KEUNECKE, D., NIEMZ, P. Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten. Zürich: ETH Zürich, Institut für Baustoffe, 06/2010, 2010, 1-156 [cit. 2020-01-28]. DOI: 10.3929/ethz-a-006113078. Dostupné z: www.doi.org/10.3929/ethz-a-006113078
- [54] Webové stránky firmy Theo Ott GmbH, Types of wood [online]. © Theo Ott GmbH [cit. 5. 2. 2020]. Dostupné z: <http://www.holzschindeln.de/en/types-of-wood/>
- [55] ČSN EN 14080, Dřevěné konstrukce – Lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo – Požadavky. Praha, Český normalizační institut. 11.2013.
- [56] Neue Holzbau. Glulam hardwood. [online] Webové stránky firmy Neue Holzbau AG. Lungern, Switzerland.[cit 21. 4. 2016] Dostupné z: <http://www.neueholzbau.ch/en/produkte/laubholz/>
- [57] Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt). Zulassungsgegenstand: BS-Holz aus Buche. Berlin, 7.6.2011.
- [58] DUTKO, Pavel. Drevené konštrukcie: učebnica pre poslucháčov stavebných fakúlt vysokých škôl technických. 2. preprac. vyd. Bratislava: Alfa, 1976. Edícia stavebníckej literatúry. 460s.
- [59] EN 1995-1-1 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut. 12.2006.
- [60] ČSN EN 15497, Konstrukční rostlé dřevo spojované zubovitým spojem – Požadavky na funkční vlastnosti a minimální výrobní požadavky. Praha, Český normalizační institut. 4.2015.
- [61] AHMAD, Zakiah, Wei Chen LUM, Seng Hua LEE, Mohd Azran RAZLAN a Wan Hazira WAN MOHAMAD. Mechanical properties of finger jointed beams fabricated from eight Malaysian hardwood species. Construction and Building Materials. 2017, 2017(vol. 145), 464-473. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.016. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817306669>
- [62] TRAN, V., OUDJENE, M., MÉAUSOONE, P. FE analysis and geometrical optimization of timber beech finger-joint under bending test. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2014, 52, 40-47. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2014.03.007. ISSN 01437496. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749614000761>
- [63] AICHER, S., HÖFFLIN, L., & BEHRENS, W. (2001). A study on tension strength of finger joints in beech wood laminations. Otto-Graf-Journal Vol. 12. 169-186. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/237529522_EINE_STUDIE_ZUR_ZUGFESTIGKEIT_VON_KEILZINKENVERBINDUNGEN_IN_BREITLAMELLEN_AUS_BUCHENHOLZ_UNE_ETUDE_SUR_LA_RESISTANCE_EN_TRACTION_DU_JOINT_D%27ABOUTAGES_EN_BOIS_DE_HETRE
- [64] BOURREAU, D.; AIMENE, Y.; BEAUCHENE, J.; THIBAUT, B.; Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods. Eur J Wood Wood Prod 2013. 71:653-62. DOI 10.1007/s00107-013-0721-4

- [65] AMMANN, S., SCHLEGEL, S., BEYER, M., AEHLIG, K., LEHMANN, M., JUNG, H., & NIEMZ, P. Quality assessment of glued ash wood for construction engineering. *European Journal of Wood and Wood Products*. 74(1) (2016), 67-74. ISSN 0018-3768. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0981-2>
- [66] TRAN, V., OUDJENE, M., & MÉAUSOONE, P. (2016). Experimental investigation on full-scale glued oak solid timber beams for structural bearing capacity. *Construction and Building Materials*, ISSN 09500618, Volume 123, p. 365-371. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.002>
- [67] KOVRYGA, A., SCHLOTZHAUER, P., STAPEL, P., MILITZ, H., VAN DE KUILEN, J.-W. G. Visual and machine strength grading of European ash and maple for glulam application. *Holzforschung*. 2019, 73(8), 773-787. DOI: 10.1515/hf-2018-0142. ISSN 1437-434X. Dostupné také z: <http://www.degruyter.com/view/j/hfsg.2019.73.issue-8/hf-2018-0142/hf-2018-0142.xml>
- [68] BAJZA, O., ROHANOVÁ, A. Hodnotenie kvality konštrukčného bukoveho dreva. *Střechy, fasády, izolace* 24, 9/2017, s. 24-26.
- [69] EHRHART, T. a R. BRANDNER. Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft- and hardwood species. *Engineering Structures*. 2018, 2018(vol. 172), 554-572. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.118. ISSN 01410296. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029617338142>
- [70] GAFF, M., BABIAK, M., VOKATÝ, V., GAŠPARÍK, M., RUMAN, D. Bending characteristics of hardwood lamellae in the elastic region. *Composites Part B: Engineering*. 2017, 2017(vol. 116), 61-75. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.12.058. ISSN 13598368. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836816315840>
- [71] AKRAMI, A., LALEICKE, P. F. Densification, screw holding strength, and Brinell hardness of European beech and poplar oriented strand boards. *Wood Material Science & Engineering*. 2017, 13(4), 236-240. DOI: 10.1080/17480272.2017.1358764. ISSN 1748-0272. Dostupné také z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17480272.2017.1358764>
- [72] BOCKEL, S., MAYER, I., KONNERTH, J. Influence of wood extractives on two-component polyurethane adhesive for structural hardwood bonding. *The Journal of Adhesion*. 2018, 94(10), 829-845. DOI: 10.1080/00218464.2017.1389279. ISSN 0021-8464. Dostupné také z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00218464.2017.1389279>
- [73] AMMAN, S., NIEMZ, P. Specific fracture energy at glue joints in European beech wood. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 60 (2015), 47-53. ISSN: 0143-7496. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.03.007>
- [74] AMMAN, S., OBERSRIEBNIG, M., KONNERTH, J., GINDL-ALTMUTTER, W., NIEMZ P. Comparative adhesion analysis at glue joints in European beech and Norway spruce wood by means of nanoindentation. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 50 (2014), 45-49. ISSN: 0143-7496. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.12.023>
- [75] KARASTERGIOU, S., BARBOUTIS, J., VASSILIOU, V. Effect of the PVA gluing on bending strength properties of finger jointed turkey oakwood (*Quercus cerris* L.). *Holz als Roh- und Werkstoff*. Vol. 64 (4), (2006), p. 339-340. DOI: 10.1007/s00107-005-0075-7. <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0075-7>
- [76] MURALEEDHARAN, A., REITERER, S. M. Combined glued laminated timber using hardwood and softwood lamellas. *Linnaeus University, Faculty of Technology*, 2016. Dostupné také z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1051604/FULLTEXT01.pdf>
- [77] SCHLOTZHAUER, P., KOVRYGA, A., EMMERICH, BOLLMUS, VAN DE KUILEN, J.-W. G., MILITZ, H. Analysis of Economic Feasibility of Ash and Maple Lamella Production for Glued Laminated Timber. *Forests*. 2019, 10(7). DOI: 10.3390/f10070529. ISSN 1999-4907. Dostupné také z: <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/7/529>

- [78] TRAN, V., OUDJENE, M., MÉAUSOONE, P. Experimental and numerical analyses of the structural response of adhesively reconstituted beech timber beams. *Composite Structures*, Vol. 119, (2015). p. 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.013>
- [79] CHANS, O., CIMADEVILA, J. E., GUTIÉRREZ, E. M. Glued joints in hardwood timber. 2008.
- [80] CROVELLA, P., SMITH, W., BARTCZAK, J. Experimental verification of shear analogy approach to predict bending stiffness for softwood and hardwood cross-laminated timber panels. *Construction and Building Materials*. 2019, 229. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116895. ISSN 09500618. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819323335>
- [81] WETZIG, M., HASS, P., HÄNSEL, A., NIEMZ, P. Untersuchungen zur Verklebung dreischichtiger Massivholzplatten unter Verwendung von Laubholz. 2011, (7). DOI: 10.1002/bate.201101490
- [82] HÄRTIG, D. Woodstock Basel: Holzkörper steht bereits [online] *Gebäude technik*, 11. 12. 2009 [cit 11. 5. 2020] Dostupné z: <https://www.gebaeudetechnik.ch/branche/marktnews/woodstock-basel-holzkoerper-steht-bereits/>
- [83] CONZETTI, M. Laubholz am Wendepunkt, Innovationen für die Holzbaubranche. *Werk, bauen + wohnen, Zeitschrift für Architektur und Städtebau: Wald und Holz*. 03/2014, s. 32–35. Dostupné také z: <https://docplayer.org/36514538-Laubholz-am-wendepunkt.html> nebo z: https://neueholzbau.ch/wp-content/uploads/2018/08/2014_Werk-Bauen-Wohnne_Laubholz-am-Wendepunkt.pdf
- [84] Kulm Tribünen-Überdachung [online]. Internetové stránky firmy A. Freund Holzbau GmbH [cit 10. 6. 2020] Dostupné z: <http://www.freund-holzbau.ch/referenzen/detail/kulm-tribuenen-ueberdachung.html>
- [85] PESTALOZZI, M. Der erste Laubholzbau. [cit. 6.4.2017] PSA Publishers Ltd. Zürich, 3.6.2015. [online] Dostupné z: http://www.swiss-architects.com/architektur-news/meldungen/Der_erste_Laubholzbau_2932
- [86] Neue Holzbau. Hardwood projects [online]. Webové stránky firmy Neue Holzbau AG. Lungern, Switzerland [cit 21. 4. 2016] Dostupné z: <https://neueholzbau.ch/en/category/references/hardwood-projects/>
- [87] BLUMEN LEHMAN AG, Report – Ein Sporthallenbau in sinnlicher und sinnhafter Balance [online], *Schweizer Holzbau* 11/2012. [cit. 3. 5. 2020] Dostupné z: https://neueholzbau.ch/wp-content/uploads/2018/08/shb_s08_13_RP_Sporthalle_Balance1.pdf nebo z: <https://www.yumpu.com/de/document/read/6448317/report-blumer-lehmann-ag>
- [88] BOGUSH, W. Objekterprobte Innovation: Eschenholz im Tragwerkbau [online], *Forum Holzbau* [cit. 3. 5. 2020] Dostupné z: https://www.forumholzbau.com/pdf_11/nl51_bogusch.pdf
- [89] KÜBLER, W., JACOB-FREITAG, S. Parkgarage, Pionierleistung mit Ausblick. *Mikado* Ausgabe, 09/2011 s. 30–34. Dostupné také z: https://neueholzbau.ch/wp-content/uploads/2018/08/neue-Holzbau-AG_Bericht-Parkgarage_Innerarosa_9-2011.pdf
- [90] Industriehalle präsentiert sich mit Dachtragwerk aus BauBuche [online]. Internetové stránky společnosti Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, 2020. [cit. 3. 5. 2020] Dostupné z: https://www.pollmeier.com/de/referenzen/siga-produktionshalle.html?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=Newsletter+Mai+19+DE
- [91] Pollmeier [online]. Internetové stránky společnosti Pollmeier, Massivholz GmbH & Co.KG, 2020. [cit. 3. 5. 2020] Dostupné z: <https://www.pollmeier.com/de/>
- [92] Neue Holzbau. BauBuche. [online] Webové stránky firmy Neue Holzbau AG. Lungern, Switzerland.[cit 4. 5. 2020] Dostupné z: <https://neueholzbau.ch/produkte/baubuche/>

- [93] KOŽELOUH, B. Třídění a návrhové charakteristiky konstrukčního dřeva [online] tzb-info.cz, 16. 6 2014 [cit. 27. 2. 2020] Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/11353-trideni-a-navrhove-charakteristiky-konstrukcniho-dreva>
- [94] ČSN EN 14081-1 Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo obdélníkového průřezu tříděné podle pevnosti - Část 1: Obecné požadavky. Praha, Český normalizační institut. 08.2016.
- [95] ČSN 73 2824-1 Třídění dřeva podle pevnosti – Část 1: Jehličnaté řezivo. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha, Český normalizační institut. 01.2015.
- [96] ČSN EN 1611-1 Řezivo - Vizuální třídění jehličnatého dřeva - Část 1: Evropské smrky, jedle, borovice a douglasky. Praha, Český normalizační institut. 07.2000.
- [97] ČSN EN 975-2 Řezivo – Vizuální třídění listnatého dřeva - Část 2: Topoly. Praha, Český normalizační institut. 11.2004.
- [98] ČSN EN 1912 Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti - Přiřazení vizuálních tříd a dřevin. Praha, Český normalizační institut. 10.2012.
- [99] ČSN EN 338 Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti. Praha, Český normalizační institut. 10.2012
- [100] MAITY, S.; CHAKRABORTY, S. Tool steel material selection using PROMETHEE II method. In: Springer-Verlag London 2015, p. 1537-1547. DOI 10.1007/s00170-014-6760-0
- [101] LIU, Y.; FAN, Z.; ZHANG, X. A method for large group decision-making based on evaluation information provided by participators from multiple groups. In: Elsevier B.V., p. 132–141, 2016. DOI 10.1016/j.inffus.2015.08.002, Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.inffus.2015.08.002>
- [102] DOUBRAVOVÁ, H. Vícekriteriální analýza variant a její aplikace v praxi, diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Ekonomická fakulta [online]. České Budějovice, 2009. [cit. 20.12.2015]
Dostupné z: http://theses.cz/id/6citbe/downloadPraceContent_adipIdno_11361
- [103] FIALA, P.; JABLONSKÝ, J.; MAŇAS, M. Vícekriteriální rozhodování: Určeno pro studenty všech fakult. Praha: Vysoká škola ekonomická, 1994. 316 s. ISBN: 80-7079-748-7
- [104] BROŽOVÁ, H., HOUŠKA, M., ŠUBRT, T. Modely pro vícekriteriální rozhodování. Praha, Credit, 2003. 178 s. ISBN 80-213-1019-7
- [105] FOTR, J., DĚDINA, J., a HRŮZOVÁ, H. Manažerské rozhodování. 2. aktualiz. vyd. Praha: Ekopress, 2000. ISBN 80-86119-20-3.
- [106] GINEVIČIUS, R.; PODVESKO, V.; NOVOTNY, M. Evaluating Lithuanian banks from the perspective of their reliability to customers by Promethee method. In: Business and Management 2010. 2010. Vilnius, Lithuania: Technika Vilnius, Galtijos kopija, 2010, s. 7. ISSN 2029-4441.
- [107] MONTAJABIHA, M. An Extended PROMETHEE II Multi-Criteria Group Decision Making Technique Based on Intuitionistic Fuzzy Logic for Sustainable Energy Planning. In: Springer Science+Business Media Dordrecht 2015, p. 221-244. DOI 10.1007/s10726-015-9440-z
- [108] ADÁMEK, J. a kol. Vlastnosti a zkoušení stavebních materiálů. Brno, Fakulta stavební VUT
- [109] ČSN EN 380, Dřevěné konstrukce. Zkušební metody. Všeobecné zásady pro statické zatěžovací zkoušky. Praha, Český normalizační institut. 07.1995.
- [110] ČSN EN 384, Konstrukční dřevo – Stanovení charakteristických hodnot mechanických vlastností a hustoty, Praha, Český normalizační institut. 10.2010.
- [111] ČSN EN 408, Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností. Praha, Český normalizační institut. 12.2012.
- [112] ČSN EN 13183-1, Vlhkost vzorku řeziva – Část 1: Stanovení váhovou metodou Praha, Český normalizační institut. 10.2002.

- [113] ČSN EN 302-1, Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Část 1: Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání. Praha, Český normalizační institut. 09.2013.
- [114] ČSN EN 302-2, Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Zkušební metody - Část 2: Stanovení odolnosti proti delaminaci. Praha, Český normalizační institut. 09.2013.
- [115] Dohnal, J. Experimentální stanovení vybraných mechanických vlastností smrku ztepilého (*Picea Abies L.*). Juniorstav 2019, sborník příspěvků. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2019. ISBN: 978-8-08-643371-4.
- [116] ČSN 49 0115 Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe. Praha: Český normalizační institut. 12.1979
- [117] ČSN 49 0116 Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti při statickom ohybe. Praha: Český normalizační institut. 7.1986.
- [118] ČSN 49 0110 Drevo. Medza pevnosti tlaku v smere vláken. Praha: Český normalizační institut. 1.1980.
- [119] ČSN 49 0108 Drevo. Zisťovanie hustoty. Praha: Český normalizační institut. 2.1993.
- [120] Kestopur 1030, technický list. Kiilto, 09/2009 Dostupné také z: <https://pim.kiilto.com/kiilto-pim-api/api/pdf/download/5ea0b9e5e4b0325e67b090f3> nebo z: <https://www.kiilto.com/en/products/kestopur-1030>
- [121] MRWood, Roman Million Wood, Český výrobce lepených konstrukčních hranolů [online]. Webové stránky firmy Roman Million Wood s.r.o. [cit 21. 4. 2019] Dostupné z: <https://www.ceskekvh.cz>
- [122] Lepené nosníky PUR systém 2010, Technický list. AkzoNobel, Casco Adhesives. 1. 14. 2011. Poskytnuto výrobcem LLD.
- [123] BOHANNON, B. Effect of size on bending strength of wood members. U.S. Department of Agriculture. Materials Science 1966. Forest Serv. Res. Pap. FPL 56
- [124] Zhou, X. Y., Cao, L., Zeng, D. L.. “Experimental Study on the Size Effect on Flexural Behavior of Larch Glulam Beams.” *Applied Mechanics and Materials* 847 (2016): 3 - 9. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.847.3
- [125] DVORSKÝ, M. Kůrovcová kalamita již přerostla v celorepublikový problém [online] Drevársky magazín, 31. 1. 2020 [cit. 28. 2. 2020] Dostupné z: <http://www.drevmag.com/cs/drevarsky-servis/6687-kurovcova-kalamita-jiz-prerostla-v-celorepublikovy-problem>

Seznam použitých symbolů a zkratek

DB	dub
BK	buk
JD	jedle
SM	smrk
TP	topol
KOS	kosodřevina
HYB	hybridní lepené lamelové nosníky
P	příčný směr
R	radiální směr
T	tangenciální směr
E	modul pružnosti při normálovém namáhání v N/mm^2
G	modul pružnosti při tangenciálním namáhání
OSB	deska z orientovaných třísek (oriented strand board)
LVL	vrstvené dřevo (laminated veneer lumber)
KVH	konstrukční dřevo spojované zubovitým spojem
CLT	křížem lepené dřevo
DUO	konstrukční hranoly ze dvou slepených lamel
TRIO	konstrukční hranoly ze tří slepených lamel
BSH	lepené lamelové dřevo, zkratka z němčiny (Brettschneitholz)
LLD	lepené lamelové dřevo
glulam	lepené lamelové dřevo, zkratka z angličtiny (glue laminated timber)
h	výška prvku, tloušťka lamely v mm
b	šířka prvku, šířka lamely v mm
SC1	třída provozu 1 podle [59]
SC1	třída provozu 2 podle [59]
SC1	třída provozu 3 podle [59]
r	poloměr křivosti lamely v mm
l_j	délka ozubu v mm
p	rozteč ozubů v mm
α	sklon ozubu

l_t	vůle v zubovitém spoji v mm
b_t	šířka tupého zakončení ozubu v mm
A	plocha v mm ²
GL	lepené lamelové dřevo
h	homogenní lepené lamelové dřevo
c	kombinované lepené lamelové dřevo
hyb	hybridní lepené lamelové dřevo
S7, S10, S13	třídy jehličnatého řeziva podle ČSN 73 2824-1 [95]
G2, G4	postupy pro třídění jehličnatého dřeva podle ČSN EN 1611-1 [96]
D30–80	třída pevnosti listnatých dřevin
f	pevnost v N/mm ²
ρ	objemová hmotnost průměrná hodnota v kg/m ³
max	maximalizační kritérium
min	minimalizační kritérium
R	kriteriální matice
R_M	upravená kriteriální matice
a	hodnocené varianty
n	počet hodnocených variant
i, j	kritéria hodnocení
m	počet kritérií
MPRV	Metoda postupného rozvrhu vah
MKPS	Metoda kvantitativního párového srovnávání
S	Saatyho matice
s_{ij}	prvky Saatyho matice
v	váha kritéria
A_j, A_k	alternativy
π	preferenční relace
d	rozdíl mezi hodnotami kritéria pro dvě srovnávané varianty
r	hodnota kritéria
p	preferenční funkce
t	číslo preferenční funkce
q^*	šíře indifferenční oblasti

p^*	šíře oblasti lineární preference
F_j^+	součet všech kladných (výstupních) relací každé j -té alternativy
F_j^-	součet všech záporných (vstupních) relací
F_j	rozdíel mezi F_j^+ a F_j^-
w	deformace v mm
t	čas v s
F	síla v N
ω	vlhkost vzorku v %
a	vzdálenost mezi působištěm zatížení a nejbližší podporou v mm
α	opravný vlhkostní koeficient závisející na způsobu zatěžování
m	hmotnost tělesa v kg
l	délka zkušebního tělesa v mm
K	koeficient objemového sesychání
θ	teplota vzduchu v °C
φ	relativní vlhkost vzduchu v %
k_f	součinitel uvažující směr zatížení
s	směrodatná odchylka
\bar{x}	průměr
\tilde{x}	medián

Použité dolní indexy:

m	v ohybu
c	v tlaku
0	rovnoběžně s vlákny
k	charakteristická hodnota
$mean$	průměrná hodnota
l	lokální
max	maximální
ω	vlhkost
j	týkající se spoje (joint)
l	týkající se lamely
g	týkající se lepeného lamelového dřeva

Seznam obrázků

Obr. 1 Podíl listnatých porostů na celkové rozloze států v Evropě (v %), mezinárodní srovnání z r. 2005 [5].....	11
Obr. 2 Evidované kůrovcové dříví ve smrkových porostech v tis. m ³ [4].....	12
Obr. 3 Zastoupení dřevin v lesních vegetačních stupních (DB = dub, BK = buk, JD = jedle, SM = smrk, KOS = kosodřevina) [9].	13
Obr. 4 Podíl jehličnatých a listnatých dřevin na celkové porostní ploše [11].	14
Obr. 5 Rozložení listnatých, smíšených a jehličnatých lesů v Evropě [16].....	17
Obr. 6 Přehled nepoužívanějších dřevin ve stavebnictví obecně [18].	18
Obr. 7 Příčný řez smrkem [archiv autora].	18
Obr. 8 Příčný řez jedlí [archiv autora].	20
Obr. 9 Příčný řez borovicí [archiv autora].	20
Obr. 10 Příčný řez bukem [archiv autora].	22
Obr. 11 Příčný řez dubem [archiv autora].	23
Obr. 12 Schematický náčrt částí kmene; 1 – kambium, 2 – běl, 3 – dřevné paprsky, 4 – letokruh, 5 – jádro, 6 – dřev, kůra se skládá ze 7 – lýka a 8 – borky [24].	26
Obr. 13 Prostorové znázornění anatomické stavby a) jehličnatého dřeva: 1 – jarní dřevo, 2 – letní dřevo, 3 – letokruh, 4 – jarní tracheida s dvojtečkami, 5 – letní tracheida, 6 – pryskyřičný kanálek, 7 – dřevný paprsek, 8 – příčná tracheida; b) listnatého dřeva, 1 - letokruh, 2 - jarní céva, 3 - letní céva, 4 - libiformní vlákno, 5 - dřevný paprsek, 6 - podélný parenchym [9].....	27
Obr. 14 Schematické znázornění základních řezů kmenem, P – příčný (transversální) řez, R – radiální řez, T – tangenciální řez [31].	30
Obr. 15 Smrk, příčný řez [29].....	31
Obr. 16 Buk, příčný řez [29].....	31
Obr. 17 Smrk, radiální řez [29].....	31
Obr. 18 Smrk, radiální řez [29].....	31
Obr. 19 Dub, radiální řez [29].....	32
Obr. 20 Dub, radiální řez [29].....	32
Obr. 21 Buk, radiální řez [29].....	32
Obr. 22 Buk, radiální řez [29].....	32
Obr. 23 Jedle, tangenciální řez [29].....	33
Obr. 24 Smrk, tangenciální řez [29].....	33
Obr. 25 Dub, tangenciální řez [29].	33
Obr. 26 Buk, tangenciální řez [29].....	33
Obr. 27 Hanácký dům s výškou [38].	39
Obr. 28 Zakládání na pilotách z listnatého dřeva [40].....	39

Obr. 29 Příklady dřevěných I nosníků [49].	41
Obr. 30 Příklad lepeného prvku pro stropní nebo střešní konstrukce, který by bylo možné vyrobit z vrstveného dřeva [50].	41
Obr. 31 Dřevěné šindele z nabídky německé firmy Theo Ott Holzschindeln: a) dubový štípaný šindel, b) habrový šindel [54].	42
Obr. 32 Přehled lepených prvků podle [55]: a) konstrukční dřevo spojované zubovitým spojem (ve výrobě označované jako KVH), b) lepené rostlé dřevo (ve výrobě označované jako DUO/TRIO hranoly), c) lepené lamelové dřevo (ve výrobě označované nejčastěji jako BSH), d) křížově lamelované dřevo (ve výrobě označované jako CLT).	43
Obr. 33 Lepený lamelový nosník z bukového dřeva, fotografie z výroby [56].	44
Obr. 34 Výskyt hesla <i>hardwood glulam</i> v databázi Science Direct.	45
Obr. 35 Příklad skladby nosníku z kombinovaného lepeného lamelového dřeva [55].	46
Obr. 36 Uspořádání desek podle průběhu letokruhů v lepeném prvku: a – nesprávné uspořádání, b – správné uspořádání [58].	47
Obr. 37 Orientace lamel v průřezu [55].	47
Obr. 38 Skladba a stykování desek v lepeném prvku: a) v průřezu, b) po délce prvku [58]; h je výška lepeného prvku, b je šířka lamely.	49
Obr. 39 Typický profil zubovitého spoje [55]; l_j je délka ozubu, p rozteč ozubů, α je sklon ozubu, l_t vůle v zubovitém spoji, b_t šířka tupého zakončení ozubu.	50
Obr. 40 Účinnost zubovitého spoje, A_1 a A_2 značí plochu zubů a A odpovídající plochu průřezu.	50
Obr. 41 Zubovitý spoj a) stojatý, b) ležatý.	51
Obr. 42 Doporučený lisovací tlak; 1 je lisovací tlak, 2 je délka ozubů [60].	53
Obr. 43 OSB desky z listnatého dřeva: a) topolového, b) bukového [71].	54
Obr. 44 Projekt Woodstock, Basilej, Švýcarsko [53], [82].	55
Obr. 45 Čistě dřevěný most Neumattbrücke [83].	55
Obr. 46 Objekt Tribune Kulm Hotel, St. Moritz, Švýcarsko [56].	56
Obr. 47 <i>House of Natural Resources</i> , Curych, Švýcarsko, a) podpory z jasanových lepených prvků, b) bukovobetonový kompozitní strop [85].	56
Obr. 48 Sportovní a víceúčelová hala, Sargans, 2011, pohled [87].	57
Obr. 49 Interiér sportovní haly v Sargansu [87].	57
Obr. 50 Nosná konstrukce sportovní haly [87].	58
Obr. 51 Použití hybridních jasanovo-smrkových lepených lamelových prvků v kompozitním dřevo-betonovém stropě dvoupodlažní části sportovní haly [87].	58
Obr. 52 Parkovací objekt tvoří vstupní portál do lyžařského střediska [88].	59
Obr. 53 Konstrukce parkovacího objektu: a) uspořádání nosné konstrukce a místa použití listnatého dřeva (tmavší barva; ozn. Laubholz), b) schéma konstrukce prvních tří rámu [89].	59

Obr. 54 Lepené lamelové nosníky s použitím jasanového dřeva v namáhaných částech a) nad podporou [88] b) v místě kloubového spoje rámu [89].	60
Obr. 55 Výrobní hala společnosti Siga: a) pohled na nosnou konstrukci haly, b) detail uložení příhradového vazníku BauBuche na prefabrikovaném železobetonovém sloupu [90].	60
Obr. 56 BauBuche – vrstvené bukové dřevo [91].	61
Obr. 57 Provedení spojů v systému GSA a) při výrobě vazníků, b) spoje pro montáž na stavbě [92].	61
Obr. 58 Návaznost cílů disertační práce.	66
Obr. 59 Struktura rozhodovacího procesu.	70
Obr. 60 Preferenční relace; výstupní toky varianty <i>a</i> jsou zobrazeny modře, výstupní toky varianty <i>a</i> zobrazeny zeleně.	74
Obr. 61 Uspořádání zkoušky pro měření pevnosti a modulu pružnosti v ohybu.	75
Obr. 62 Zkouška vzorku dřeviny ve čtyřbodovém ohybu [archiv autora].	76
Obr. 63 Uspořádání zkoušky pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny [archiv autora].	78
Obr. 64 Geometrie zubovitého spoje.	81
Obr. 65 a) Nanášení lepidla pomocí zubovité šablony (vlevo), b) lisování spoje pomocí přípravku, c) vytlačování lepidla při lisování na všech površích zubovitého spoje [archiv autora].	81
Obr. 66 Rozměry vzorku a schéma uspořádání zkoušky pro pevnost v ohybu, rozměry v mm.	82
Obr. 67 Zkouška pevnosti za ohybu lamel spojovaných zubovitým spojem [archiv autora].	82
Obr. 68 Zkoušené vzorky LLD; BK = buk, TP = topol, SM = smrk.	85
Obr. 69 Výroba LLD (a) nanášení lepidla, (b) seskládání nosníku v lisu [archiv autora].	86
Obr. 70 Geometrie zkoušky LLD ve čtyřbodovém ohybu, rozměry v mm.	86
Obr. 71 Osazení snímačů dráhy na zkušební těleso; poloha řezů odpovídající Obr. 70: a) u levé podpory, b) ve středu rozpětí, c) u pravé podpory, rozměry v mm.	87
Obr. 72 Zkouška zkušební tělesa LLD ve čtyřbodovém ohybu [archiv autora].	87
Obr. 73 Uspořádání zkoušky pevnosti a modulu pružnosti v ohybu lamel, rozměry v mm.	89
Obr. 74 Závislost mezi dostatkem, cenou a využitím suroviny.	92
Obr. 75 Hodnoty testování pevnosti ve čtyřbodovém ohybu (experiment 1B) vyjádřené pomocí krabicového grafu.	95
Obr. 76 Srovnání chování jednotlivých klimatolerantních dřevin.	97
Obr. 77 Experiment 1C hodnoty testování modulu pružnosti ve čtyřbodovém ohybu vyjádřené pomocí krabicového grafu.	97
Obr. 78 Hodnoty testování pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny vyjádřené pomocí krabicového grafu.	99
Obr. 79 Zjednodušené porovnání variant pomocí paprskového grafu.	102
Obr. 80 Porušení vzorků při zatěžování: a) porušení ve vrstvě lepidla s vodorovnou trhlinou mezi tlačnou a taženou částí, b) nejčastější porušení podél lepených ploch zubovitého spoje s určitým selháním v kořenech ozubů [archiv autora].	106

Obr. 81 Výsledky zkoušek pevnosti ve čtyřbodovém ohybu vyjádřené krabicovým grafem.	106
Obr. 82 Srovnání selhání zubovitého spoje numerické a experimentální [62].	107
Obr. 83 Výskyt a) buku, b) topolu v celosvětovém měřítku [16].	109
Obr. 84 Zkoušení pevnosti a modulu pružnosti lamel ve čtyřbodovém ohybu, a) buk, b) topol [archiv autora].	112
Obr. 85 Zkouška lamel ve čtyřbodovém ohybu (experiment 3B), závislost síly na deformaci; SM = smrk, TP = topol, BK = buk.	113
Obr. 86 Výsledky testování pevnosti ve čtyřbodovém ohybu lamel (experiment 3B) vyjádřené pomocí krabicového grafu.	113
Obr. 87 Výsledky testování modulu pružnosti ve čtyřbodovém ohybu lamel (experiment 3C) vyjádřené pomocí krabicového grafu.	115
Obr. 88 Zkoušení pevnosti a modulu pružnosti lepených nosníků ve čtyřbodovém ohybu [archiv autora].	118
Obr. 89 Pracovní diagramy lepených lamelových nosníků; BK = bukové homogenní lepené lamelové nosníky, HYB = bukovo-topolové hybridní lepené lamelové nosníky, SM = smrkové homogenní lepené lamelové nosníky.	118
Obr. 90 Výsledky experimentu 3E vyjádřené pomocí krabicového grafu; BK = homogenní bukové nosníky, HYB = hybridní bukovo-topolové nosníky, SM = homogenní smrkové nosníky.	119
Obr. 91 Příklady porušení smrkového homogenního nosníku (SM) [archiv autora].	120
Obr. 92 Příklady porušení smrkového homogenního nosníku (SM) [archiv autora].	120
Obr. 93 Příklady porušení hybridního bukovo-topolového nosníku (HYB) [archiv autora].	121
Obr. 94 Příklady porušení hybridního bukovo-topolového nosníku (HYB) [archiv autora].	121
Obr. 95 Příklady porušení homogenního bukového nosníku (BK) [archiv autora].	121
Obr. 96 Příklady porušení homogenního bukového nosníku (BK) [archiv autora].	122
Obr. 97 Výsledky testování modulu pružnosti ve čtyřbodovém ohybu lepených nosníků vyjádřené pomocí krabicového grafu; BK = homogenní bukové nosníky, HYB = hybridní bukovo-topolové nosníky, SM = homogenní smrkové nosníky.	123
Obr. 98 Vlhkost dřeva jako funkce relativní vlhkosti vzduchu a teploty [33].	133
Obr. 99 Možné varianty složení průřezu hybridních lepených prvků [archiv autora].	133

Seznam tabulek

Tab. 1 Vývoj podílu jednotlivých dřevin na celkové porostní ploše lesů ČR v % [12].	15
Tab. 2 Rekonstruovaná přirozená, současná a doporučená skladba lesa České republiky – podíl na celkové porostní ploše v % [5].	16
Tab. 3 Srovnání lesní plochy a objemu celkové těžby České republiky a sousedních států [15].	17
Tab. 4 Přehled vlastností smrkového dřeva.	19
Tab. 5 Přehled vlastností jedlového dřeva.	20
Tab. 6 Přehled vlastností borového dřeva.	21
Tab. 7 Přehled vlastností bukového dřeva.	22
Tab. 8 Přehled vlastností dubového dřeva.	23
Tab. 9 Zastoupení hlavních složek podle dřevin [21].	25
Tab. 10 Zastoupení anatomických elementů v závislosti na druhu dřeviny.	28
Tab. 11 Rozdělení anatomických elementů dřevin podle jejich funkce.	29
Tab. 12 Objemová hmotnost dřeva v kg/m^3 při vlhkosti 0 % [9], [28].	34
Tab. 13 Opracovatelnost a tvrdost dřeva – srovnání hodnot dostupných v literatuře; P = čelní tvrdost, R = radiální tvrdost, T = tangenciální tvrdost.	35
Tab. 14 Sesychání od čerstvého k suchému stavu vyjádřené v % z rozměrů dřeva v čerstvém stavu.	36
Tab. 15 Srovnání pevností v tlaku v N/mm^2 vybraných dřevin podle odborné literatury.	37
Tab. 16 Srovnání pevností v ohybu v N/mm^2 vybraných dřevin podle odborné literatury.	37
Tab. 17 Srovnání modulů pružnosti v ohybu v N/mm^2 vybraných dřevin.	38
Tab. 18 Doporučené hodnoty lisovacího tlaku podle [55].	49
Tab. 19 Přiřazení tříd listnatých dřevin k třídám pevnosti [98].	64
Tab. 20 Vybrané třídy pevnosti a charakteristické a průměrné hodnoty listnatého dřeva v N/mm^2 [99].	64
Tab. 21 Charakteristická pevnost zubovitého spoje v ohybu $f_{m,j,k}$ v N/mm^2 pro bukové lepené lamelové dřevo; h = homogenní, c = kombinované [57].	83
Tab. 22 Objemová hmotnost – srovnání výsledků experimentu 1A s odbornou literaturou a se smrkem.	94
Tab. 23 Pevnost v ohybu klimatolerantních dřevin – srovnání výsledků experimentu s odbornou literaturou a se smrkem.	96
Tab. 24 Srovnání modulu pružnosti v ohybu klimatolerantních dřevin určené experimentem a uvedené v literatuře a se smrkem.	98
Tab. 25 Srovnání pevností v tlaku klimatolerantních dřevin ve směru vláken experimentálně určené a se smrkem.	99
Tab. 26 Srovnání výskytu suků a rovnovláknitosti jednotlivých dřevin.	100
Tab. 27 Vstupní hodnoty multikriteriální analýzy.	101

Tab. 28 Hodnoty váhy i -tého kritéria určené Metodou postupného rozvrhu vah a Saatyho metodou.	103
Tab. 29 Výsledky získané výpočtem výhodnosti použití hodnocených druhů tvrdých dřevin metodou PROMETHEE.	103
Tab. 30 Experiment 2, pevnost v ohybu lamel spojených zubovitým spojem s použitím PUR lepidla, srovnání s referenčními vzorky.	105
Tab. 31 Srovnání opracovatelnosti topolu a buku podle [16].	110
Tab. 32 Sesychání od čerstvého k suchému stavu vyjádřené v % z rozměrů dřeva v čerstvém stavu.	110
Tab. 33 Objemová hmotnost dřeva lamel zjištěná v experimentu 3A, průměrné hodnoty.	111
Tab. 34 Objemová hmotnost – srovnání výsledků experimentu s odbornou literaturou.	111
Tab. 35 Experimentálně určená pevnost lamel v ohybu a srovnání hodnot s odbornou literaturou.	114
Tab. 36 Experimentálně určený modul pružnosti lamel v ohybu a srovnání hodnot s odbornou literaturou.	115
Tab. 37 Experimentálně zjištěná objemová hmotnost LLD hmotnost ρ v kg/m^3 , průměrné hodnoty pro $\omega = 12\%$.	116
Tab. 38 Průměrná hodnota objemové hmotnosti $\rho_{g,mean}$ v kg/m^3 pro homogenní lepené lamelové dřevo [55].	117
Tab. 39 Charakteristická hodnota objemové hmotnosti ρ_k v kg/m^3 pro bukové lepené lamelové dřevo [57].	117
Tab. 40 Charakteristická hodnota objemové hmotnosti $f_{m,k}$ v N/mm^2 pro hybridní lepené lamelové nosníky s krajními bukovými lamelami [57].	117
Tab. 41 Experimentálně určená pevnost lepených lamelových nosníků v ohybu.	119
Tab. 42 Charakteristická pevnost $f_{m,k}$ v N/mm^2 pro homogenní lepené lamelové dřevo [55].	122
Tab. 43 Charakteristická pevnost $f_{m,k}$ v N/mm^2 pro bukové lepené lamelové dřevo [57].	122
Tab. 44 Charakteristická pevnost $f_{m,k}$ v N/mm^2 pro bukové hybridní lepené lamelové nosníky [57].	122
Tab. 45 Experimentálně určený modul pružnosti lepených lamelových nosníků v ohybu.	123
Tab. 46 Průměrná hodnota modulu pružnosti E_{mean} v N/mm^2 pro homogenní lepené lamelové dřevo [55].	124
Tab. 47 Průměrná hodnota modulu pružnosti E_{mean} v N/mm^2 pro bukové lepené lamelové dřevo; h = homogenní, c = kombinované [57].	124
Tab. 48 Průměrná hodnota modulu pružnosti E_{mean} v N/mm^2 pro bukové hybridní lepené lamelové nosníky [57].	124
Tab. 49 Shrnutí všech hodnot objemových hmotností jednotlivých dřevin zjištěných při jednotlivých experimentech pro $\omega = 12\%$ a jejich porovnání s hodnotami uvedenými v odborné literatuře.	125
Tab. 50 Shrnutí všech hodnot objemových hmotností jednotlivých dřevin zjištěných při jednotlivých experimentech pro $\omega = 0\%$ a jejich porovnání s hodnotami uvedenými v odborné literatuře.	126

Tab. 51 Shrnutí všech hodnot pevností v ohybu jednotlivých dřevin zjištěných při jednotlivých experimentech a jejich porovnání s hodnotami uvedenými v odborné literatuře.....	127
Tab. 52 Shrnutí všech hodnot modulu pružnosti v ohybu jednotlivých dřevin zjištěných při jednotlivých experimentech a jejich porovnání s hodnotami uvedenými v odborné literatuře.....	127

